

Estudio de la evolución de la energía en los armónicos de la velocidad de giro en la señal de vibración ante defecto en ejes



PROYECTO FIN DE CARRERA **INGENIERÍA INDUSTRIAL**

Autora:

Cristina Cerrada Collado

Tutoras:

Cristina Castejón Sisamón

María Jesús Gómez García

Departamento de Ingeniería Mecánica

Escuela Politécnica Superior

Universidad Carlos III de Madrid

MAYO 2016

Estudio de la evolución de la energía en los armónicos de la velocidad de giro en la señal de vibración ante defecto en ejes

PROYECTO FIN DE CARRERA
INGENIERÍA INDUSTRIAL

Autora:
Cristina Cerrada Collado

Tutoras:
Cristina Castejón Sisamón
María Jesús Gómez García

Departamento de Ingeniería Mecánica
Escuela Politécnica Superior
Universidad Carlos III de Madrid

MAYO 2016

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mis tutoras Cristina Castejón y María Jesús Gómez la oportunidad que me han brindado de trabajar con ellas, así como su paciencia y consejos.

En segundo lugar, quiero agradecer a mis padres y a mi hermano todo el apoyo que me han dado a lo largo de mis estudios, especialmente en los momentos más difíciles. Sobre todo el que nunca hayan dejado de confiar en mí, incluso cuando yo misma lo he dejado de hacer.

Por último, agradezco a Enrique su preocupación y las críticas constructivas realizadas para mejorar este proyecto.

Muchas gracias.

RESUMEN

Hoy en día el mantenimiento industrial tiende al denominado *condition monitoring*. Esta técnica de mantenimiento consiste en la monitorización de un parámetro significativo para detectar un fallo mecánico antes de que ocurra. Con esto se consigue mejorar el nivel de fiabilidad y seguridad del mantenimiento, al mismo tiempo que un ahorro de costes por averías y paradas. Uno de los parámetros que mejores resultados ha proporcionado es la respuesta vibratoria de un elemento mecánico y por esta razón es el seleccionado en este proyecto.

El mantenimiento que se realiza en la industria ferroviaria es preventivo, lo que conlleva numerosos gastos y lastra esta industria frente a otras. La implantación de la técnica *condition monitoring* en esta industria permitiría un ahorro de costes y un aumento de la seguridad. Pero todavía queda un largo camino para que eso sea posible. Porque aunque para elementos como rodamientos y engranajes se han realizado múltiples estudios, otros elementos importantes como ejes no han sido suficientemente analizados, así como tampoco lo ha sido la interacción entre distintos elementos dañados. Por esto el presente proyecto fin de carrera pretende contribuir y complementar los estudios prácticos que se están desarrollando sobre *condition monitoring* dentro del grupo de investigación MAQLAB de la Universidad Carlos III de Madrid, empleando análisis de vibraciones para la detección de fallos en ejes ferroviarios.

El objetivo del proyecto es utilizar las señales de vibración, en una réplica a escala 1/8 de un eje ferroviario ensayado en el laboratorio, para determinar un patrón de referencia que permita discernir si un eje está sano o no.

Las condiciones de ensayo han sido: eje sano y con distintos niveles de defecto en la zona del cambio de sección, para las velocidades de giro correspondientes con las frecuencias de 20, 40 y 60 Hz.

Las señales de vibración obtenidas han sido transformadas en paquetes Wavelet, de los que se ha calculado su energía. Seguidamente se han seleccionado una serie de paquetes de energía relevantes que han sido analizados en busca de un patrón de referencia.

Luego, se han calculado las curvas POD para comprobar la eficacia de detección de defectos a partir del análisis de la energía de una señal de vibración.

Del proyecto se concluye que es viable obtener un patrón a partir del análisis de la energía de una señal de vibración, si bien quedan aún abiertas líneas de trabajo para su perfeccionamiento y mejora.



Índice

AGRADECIMIENTOS.....	v
RESUMEN.....	vii
Capítulo 1: Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estructura del documento	3
Capítulo 2: Mantenimiento industrial	5
2.1. Definición y objetivos	5
2.2. Evolución del mantenimiento industrial.....	6
2.2.1. Tendencias del mantenimiento industrial en el siglo XX	6
2.2.2. Tendencias del mantenimiento industrial en el siglo XXI	7
2.2.3. Evolución del mantenimiento en ejes ferroviarios	8
2.3. Mantenimiento predictivo.....	11
2.4. Mantenimiento predictivo basado en análisis de vibraciones.....	14
2.4.1. Caracterización de defectos a partir de señales vibratorias.....	14
2.5. Procesamiento de señales en defectología	17
2.5.1. Transformada de Fourier	17
2.5.2. Transformada Wavelet	20
2.5.3. Transformada Wavelet continua	21
2.5.4. Transformada Wavelet discreta	21
2.5.5. Análisis multiresolución	22
2.5.6. Transformada en paquetes Wavelet.....	23
Capítulo 3: Sistema Experimental	27
3.1. Banco de ensayos	27
3.1.1. Motor.....	28
3.1.2. Variador de Frecuencia	28
3.1.3. Espécimen ensayado.....	30
3.2. Cadena de medida.....	31
3.2.1. Acelerómetro	31
3.2.2. Acondicionador	32



3.2.3.	<i>Tarjeta de adquisición</i>	33
3.2.4.	<i>Software</i>	33
3.3.	Condiciones de ensayo	33
3.3.1.	<i>Defectos a estudiar</i>	34
3.3.2.	<i>Número de medidas a tomar</i>	35
3.4.	Protocolo de medidas.....	36
3.5.	Base de datos generada	37
Capítulo 4: Obtención y análisis de resultados experimentales		41
4.1.	Parámetros necesarios y proceso de transformación	41
4.2.	Selección de paquetes de energía	42
4.3.	Tratamiento de los paquetes seleccionados	43
4.3.1.	<i>Cálculo de las curvas POD</i>	44
4.4.	Resultados	45
4.4.1.	<i>Resultados para 20 Hz</i>	46
4.4.2.	<i>Resultados para 40 Hz</i>	50
4.4.3.	<i>Resultados para 60 Hz</i>	55
4.4.4.	<i>Consideraciones finales</i>	59
Capítulo 5: Conclusiones y futuros desarrollos		61
5.1.	Conclusiones.....	61
5.1.1.	<i>Consideraciones sobre el sistema experimental</i>	61
5.1.2.	<i>Consideraciones sobre el tratamiento de las señales</i>	61
5.1.3.	<i>Consideraciones sobre los resultados</i>	62
5.2.	Futuros desarrollos.....	62
Bibliografía		65
Anexo A: Plano del eje ferroviario		67
Anexo B: Protocolo de medidas		69
Anexo C: Gráficos de los resultados		71

Índice de Figuras

Figura 1.1: Evolución de la eficacia del mantenimiento.	1
Figura 1.2: Representación esquemática de la metodología denominada <i>condition monitoring</i>	2
Figura 2.1: Tendencias del mantenimiento industrial desde el siglo XX.	8
Figura 2.2: Aplicación de ultrasonidos a un espécimen.	9
Figura 2.3: Ejemplo de curva POD ideal.	10
Figura 2.4: Prueba de Partículas Magnéticas	11
Figura 2.5: Ejemplo del espectro de frecuencia típico del desequilibrio.....	15
Figura 2.6: a) Tipos de desalineamiento entre ejes. b) Desalineamiento entre eje y rodamiento	15
Figura 2.7: Ejemplo del espectro de frecuencia típico del desalineamiento	16
Figura 2.8: Ejemplo del espectro de frecuencia correspondiente a piezas desajustadas.....	16
Figura 2.9: Aliasing	19
Figura 2.10: Error de ventana temporal	20
Figura 2.11: Familias Wavelets más utilizadas como Wavelet madre: a) Wavelet Sombrero Mexicano. b) Wavelet Morlet. c) Coiflet 3. d) Wavelet Meyer. e) Symlet 6. f) Wavelet Daubechies 6.....	21
Figura 2.12: Descomposición de una señal mediante Transformada Wavelet discreta en información de aproximación (A) y de detalle (D).	22
Figura 2.13: Procedimiento de descomposición hasta nivel 3 con análisis multiresolución.....	23
Figura 2.14: Procedimiento de descomposición hasta nivel 3 con transformada en paquetes Wavelet 24	
Figura 2.15: Ejemplo de descomposición de una señal mediante la transformada en paquetes Wavelet.....	25
Figura 2.16: Energías relativas de una señal obtenida mediante la transformada en paquetes Wavelet a nivel 3	26
Figura 3.1: Banco de ensayos utilizado (ROTOKIT).....	27
Figura 3.2: Motor del banco de ensayos utilizado	28
Figura 3.3: Variador de frecuencia.....	29
Figura 3.4: Plano del espécimen ensayado.	30
Figura 3.5: Cadena de medida	31
Figura 3.6: Acelerómetro.	31
Figura 3.7: Sistema ROTOKIT con acelerómetro instalado.....	32
Figura 3.8: Acondicionador de señal.....	32
Figura 3.9: Tarjeta de adquisición Keithley KUSB-3100.	33
Figura 3.10: Detalle del defecto 7 en el eje	35
Figura 3.11: Parámetros definidos en la herramienta Btool para la adquisición de datos.	37
Figura 3.12: Almacenamiento de datos en los ensayos.....	38
Figura 3.13: Señal temporal obtenida del sistema experimental para eje con nivel 2 de defecto.	38
Figura 3.14: Paquetes de energía a nivel de descomposición 9 para eje con nivel 7 de defecto.	39
Figura 4.1: Wavelet madre Daubechies 6.	42
Figura 4.2: Diagrama de flujo del trabajo realizado para la obtención de resultados.....	45

Figura 4.3: Valor medio y desviación (en azul) de energía, junto con valor umbral (en rojo), para el paquete 3, correspondiente con la frecuencia del primer armónico de la velocidad de giro de 20 Hz.	46
Figura 4.4: Valor medio y desviación (en azul) de energía, junto con valor umbral (en rojo), para el paquete 4, correspondiente con el paquete vecino del primer armónico de la velocidad de giro de 20 Hz.	47
Figura 4.5: a) curva POD del primer armónico a 20 Hz. b) curva POD del vecino primer armónico a 20Hz.	47
Figura 4.6: Valor medio y desviación (en azul) de energía, junto con valor umbral (en rojo), para el paquete 5, correspondiente con el paquete vecino del segundo armónico de la velocidad de giro de 20 Hz.	48
Figura 4.7: curva POD del vecino segundo armónico a 20Hz.	48
Figura 4.8: Valor medio y desviación (en azul) de energía, junto con valor umbral (en rojo), para el paquete 10, correspondiente con el paquete vecino del cuarto armónico de la velocidad de giro de 20 Hz.	49
Figura 4.9: curva POD del vecino cuarto armónico a 20Hz.	49
Figura 4.10: a) Valor medio y desviación (en azul) de energía, junto con valor umbral (en rojo), para el paquete 25, correspondiente con el paquete vecino del quinto armónico de la velocidad de giro de 20 Hz. b) curva POD del paquete 25.	50
Figura 4.11: a) Valor medio y desviación (en azul) de energía, junto con valor umbral (en rojo), para el paquete 5, correspondiente con el paquete vecino del primer armónico de la velocidad de giro de 40 Hz. b) Valor medio y desviación (en azul) de energía, junto con valor umbral (en rojo), para el paquete 12, correspondiente con la frecuencia del segundo armónico de la velocidad de giro de 40 Hz.	51
Figura 4.12: a) curva POD del vecino del primer armónico a 40Hz. b) curva POD del segundo armónico a 40Hz.	51
Figura 4.13: a) Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 23, correspondiente con la frecuencia del cuarto armónico de la velocidad de giro de 40 Hz. b) Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 24, correspondiente con el paquete vecino del cuarto armónico de la velocidad de giro de 40 Hz	52
Figura 4.14: Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 50, correspondiente con el paquete vecino del quinto armónico de la velocidad de giro de 40 Hz.	53
Figura 4.15: Probabilidad de detección por debajo del valor umbral para el paquete vecino del quinto armónico de la velocidad de giro de 40 Hz. a) optimizando falsas alarmas. b) optimizando tasas de detección.....	53
Figura 4.16: Valor medio y desviación (en azul) de energía, junto con valor umbral (en rojo) para el paquete 52, correspondiente con la frecuencia del quinto armónico de la velocidad de giro de 40 Hz.	54
Figura 4.17: Probabilidad de detección por debajo del valor umbral para el paquete 52, correspondiente con la frecuencia del quinto armónico de la velocidad de giro de 40 Hz ...	54
Figura 4.18: Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 16, correspondiente con la frecuencia del primer armónico de la velocidad de giro de 60 Hz.....	56
Figura 4.19: Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 31, correspondiente con la frecuencia del segundo armónico de la velocidad de giro de 60 Hz.	56
Figura 4.20: Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 61, correspondiente con la frecuencia del cuarto armónico de la velocidad de giro de 60 Hz.	57



Figura 4.21: Valor medio y desviación (en azul) de energía, junto con valor umbral (en rojo) para el paquete 44, correspondiente con el paquete vecino del quinto armónico de la velocidad de giro de 60 Hz.	57
Figura 4.22: Probabilidad de detección por debajo del valor umbral para el paquete 44, correspondiente con el paquete vecino del quinto armónico de la velocidad de giro de 60 Hz.	58
Figura 4.23: Valores de energía para el paquete 17.	58

Índice de Tablas

Tabla 2.1: Técnicas predictivas más usuales	13
Tabla 3.1: Características del motor	28
Tabla 3.2: Características del variador de frecuencia	29
Tabla 3.3: Características del espécimen ensayado	30
Tabla 3.4: Niveles de defecto ensayados en el eje.....	34
Tabla 4.1: Paquetes de energía seleccionados para cada frecuencia y armónico	43

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Vivimos en una sociedad cada vez más rodeada y dependiente de máquinas, por lo que las tareas de mantenimiento resultan de absoluta importancia. Al igual que las máquinas han sufrido una gran evolución a lo largo de los años, el mantenimiento industrial a su vez experimenta un proceso de mejora continua, que se ve reflejado en la eficacia conseguida (Ver Figura 1.1).

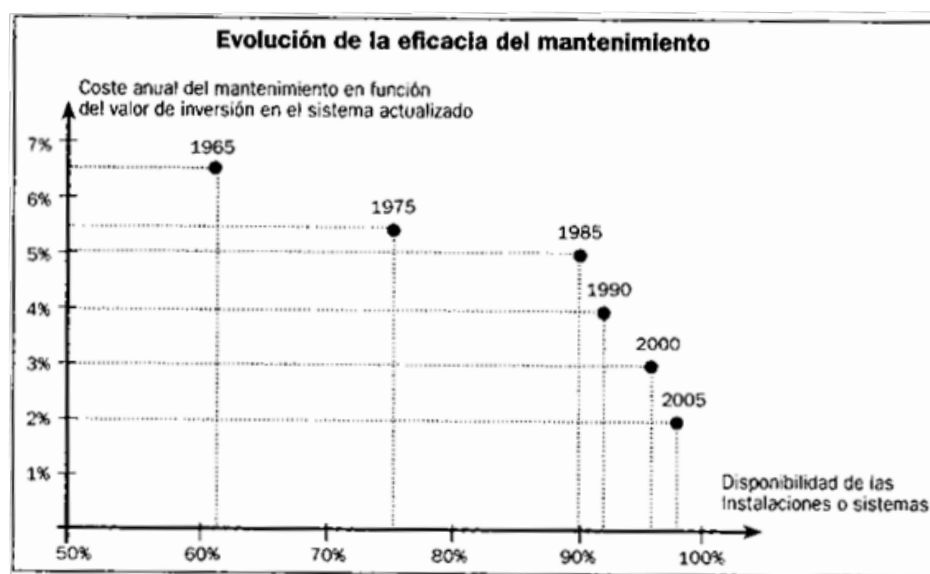


Figura 1.1: Evolución de la eficacia del mantenimiento [4].

La tendencia actual del mantenimiento industrial se dirige hacia el *condition monitoring* [5], también conocido como monitorización de estado o mantenimiento predictivo basado en la monitorización.

Condition monitoring consiste en la comprobación continua del estado de una máquina en funcionamiento mediante el control de un parámetro o variable significativa. Dicho parámetro, generalmente mecánico, se compara con un patrón referente al funcionamiento normal de la máquina. Con esta operación se detectan los defectos mucho antes de que se produzca el fallo mecánico o funcional, lo que permite programar

la reparación en el momento más conveniente. Como puede observarse en la Fig. 2, se identifica un punto de fallo potencial que permite calcular el intervalo de tiempo que resta hasta el fallo funcional.

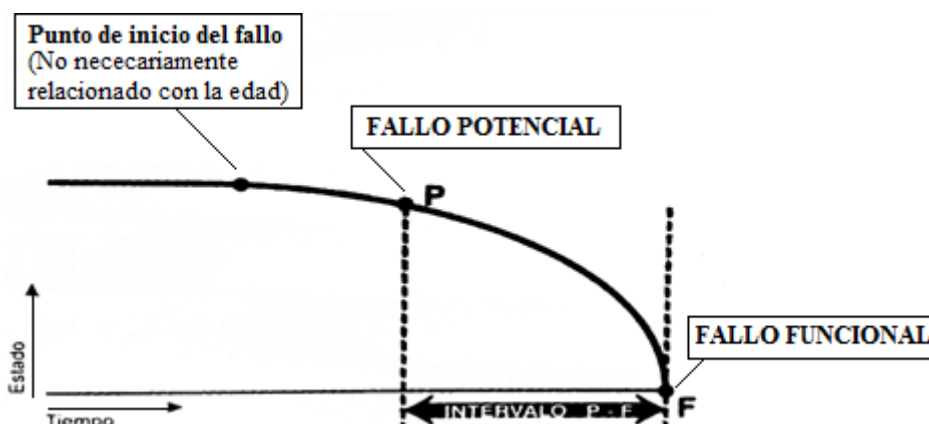


Figura 1.2: Representación esquemática de la metodología denominada *condition monitoring* [4].

En los últimos años, este tipo de mantenimiento se ha implantado con éxito en numerosas máquinas pertenecientes a distintos sectores industriales. Entre las máquinas que ya cuentan con este sistema de mantenimiento cabe destacar: aerogeneradores, turbomaquinaria, bombas, motores eléctricos y ventiladores de refrigeración [17, 18].

La industria ferroviaria, comparada con las demás industrias, se sitúa un poco a la cola de la innovación, en cuanto a mantenimiento industrial se refiere. La gran necesidad de sistemas que garanticen la seguridad de personas y mercancías, hace que esta industria mantenga los métodos de mantenimiento más tradicionales.

El presente proyecto fin de carrera pretende contribuir y complementar los estudios prácticos que se están desarrollando sobre *condition monitoring* dentro del grupo de investigación MAQLAB de la Universidad Carlos III de Madrid, empleando análisis de vibraciones para la detección de fallos en ejes ferroviarios.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es estudiar y definir un patrón que permita analizar la existencia de fisuras en ejes ferroviarios. Este patrón deberá poder utilizarse para implementar un tipo de mantenimiento predictivo basado en el análisis de señales de vibración.

Para la consecución de este objetivo general se pretende seguir una metodología similar a la utilizada en trabajos previos, por lo que deberán tenerse en cuenta otra serie de objetivos más específicos que se citan a continuación:

- Estudio de la respuesta de un eje ferroviario, a escala 1/8, con distintos niveles de defectos transversales localizados en el cambio de sección, ante distintas velocidades de rotación. Concretamente, se estudiarán 9 niveles de defecto para las velocidades de rotación correspondientes a las frecuencias de 20, 40 y 60 Hz.
- Adquisición y tratamiento de señales de vibración, empleando herramientas de Matlab, para obtener la energía de los paquetes Wavelet en la que se basa este proyecto.
- Análisis de los paquetes de energía correspondientes al primer, segundo, cuarto y quinto armónico de cada velocidad de rotación. Este objetivo pretende ampliar y mejorar un trabajo anterior que se limitaba al tercer armónico, por lo que se deberán comparar los resultados obtenidos en ambos estudios.
- Comprobación de la eficacia de detección de defectos a partir del análisis de la energía de una señal de vibración, mediante el cálculo de las curvas POD (*Probability of Detection*) basado en el método de Señal de Respuesta.

1.3. Estructura del documento

La estructura adoptada para el presente documento se describe a continuación.

El **capítulo uno** se dedica a exponer la motivación del proyecto, presentando la tendencia actual de la tecnología empleada. También se perfilan los principales objetivos del mismo y se plantea la organización de este documento.

En el **capítulo dos** se dan unas nociones generales sobre el mantenimiento industrial, centrándose especialmente en el sector ferroviario. A continuación, se explica cómo utilizar las señales vibratorias para detectar la existencia de defectos en máquinas y mecanismos.

El **capítulo tres** se dedica a explicar cómo se ha llevado a cabo la parte experimental del presente proyecto. Se describe tanto el banco de ensayos utilizado como la cadena de medida implementada y las condiciones de ensayo manejadas.

El **capítulo cuatro** está dedicado al análisis de los datos experimentales y a la elaboración y presentación de los resultados obtenidos a partir de la información procesada.

El documento finaliza con el **capítulo cinco** donde se aportan las conclusiones extraídas del estudio realizado y se proponen trabajos futuros.

Adicionalmente la memoria incluye tres anexos donde se recogen: el plano del eje ferroviario estudiado, el protocolo de medidas seguido para la adquisición de datos, y el conjunto completo de resultados gráficos obtenidos.

Capítulo 2

Mantenimiento industrial

En este capítulo se introducen las nociones básicas sobre el mantenimiento industrial. Se toma como punto de partida la definición, los objetivos y la evolución de dicho mantenimiento, principalmente enfocado hacia el mantenimiento ferroviario, que es el que realmente atañe a este proyecto. Después, el capítulo se centra en el mantenimiento predictivo, o *condition monitoring*, analizando las distintas técnicas englobadas dentro de este tipo de mantenimiento; en particular se detalla la técnica basada en el análisis de vibraciones. Finalmente, se detallan los principales métodos de procesamiento de señales de vibración en defectología, haciendo especial hincapié en la transformada en paquetes Wavelet.

2.1. Definición y objetivos

Se entiende por mantenimiento industrial, el conjunto de actividades técnicas, tales como trabajos de reparación y revisión, llevadas a cabo en instalaciones (si se trata de una planta) o en los componentes (si se trata de una máquina), con el fin de garantizar el funcionamiento regular y el buen estado de conservación de un sistema en general [8].

Los objetivos del mantenimiento industrial se concretan, según [8], en los siguientes puntos:

- Evitar, reducir, y en su caso, reparar, los fallos sobre los bienes.
- Disminuir la gravedad de los fallos que no se lleguen a evitar.
- Evitar detenciones inútiles o paros de máquinas.
- Evitar accidentes.
- Evitar incidentes y aumentar la seguridad para las personas.
- Conservar los bienes productivos en condiciones seguras y preestablecidas de operación.
- Reducir costes.
- Alcanzar o prolongar la vida útil de los bienes.

2.2. Evolución del mantenimiento industrial

2.2.1. Tendencias del mantenimiento industrial en el siglo XX

Las referencias más importantes del mantenimiento industrial se encuentran en el siglo XX, dentro del cual, pueden distinguirse tres etapas diferentes en cuanto a la forma de entender el mantenimiento. Estas etapas se pueden denominar generaciones y no poseen una clara separación en el tiempo porque cada sector de la industria ha experimentado su evolución a un ritmo diferente. El sector aeronáutico se ha mantenido desde el principio en cabeza frente al industrial, naval y ferroviario [4].

Las actividades de mantenimiento realizadas durante la primera generación consistían, principalmente, en reparar y sustituir las piezas deterioradas, sólo en caso de avería. Esta clase de actividades se aproximan a lo que conocemos como mantenimiento correctivo (mantenimiento que surge durante la revolución industrial del siglo XIX), y que es el que se encarga de la reparación una vez producido el fallo. Se distinguen dentro de este tipo de mantenimiento dos corrientes: la primera, conocida como mantenimiento paliativo o de campo, se centra únicamente en la reparación sin buscar la causa que provocó la avería. La segunda, denominada mantenimiento curativo se encarga de eliminar la causa que provocó la avería, además de la reparación. Los grandes inconvenientes del mantenimiento correctivo son que se producen paradas y daños imprevisibles en las máquinas de forma incontrolable y que es difícil controlar el stock de piezas de recambio [6].

La segunda generación no deja de lado el mantenimiento correctivo pero centra sus esfuerzos en conseguir mayor disponibilidad, duración y fiabilidad de las máquinas, a la vez que disminuye costes. Para conseguirlo, esta generación avanza hacia el mantenimiento preventivo, que consiste en planificar revisiones periódicas, en la que se pueden realizar ciertas reparaciones o cambios de piezas, según determinados criterios, apoyados en el conocimiento de las máquinas, en históricos obtenidos de las mismas y en la experiencia, con el fin de reducir la probabilidad de avería de una máquina. Algunas de las operaciones que se realizan durante las revisiones periódicas son: desmontar, limpiar, engrasar o cambiar piezas. Este mantenimiento permite llevar a cabo las revisiones con paradas programadas de las instalaciones en el momento más oportuno, así como mejorar la previsión de recambios necesarios.

Por último, en la tercera generación se evoluciona hacia métodos de mantenimiento que intervengan sólo cuando sea necesario, disminuyendo la participación de tareas preventivas rutinarias, excepto en los casos que tienen una eficacia y rentabilidad contrastada. Surge entonces el mantenimiento predictivo, basado en la monitorización de una variable o parámetro físico significativo que determine el estado de la máquina y permita predecir la avería antes de que se produzca, de tal forma que se pueda intervenir antes de que la máquina deje de trabajar en sus condiciones óptimas o aparezca un fallo catastrófico. La gran ventaja de este mantenimiento, del que hablaremos más extensamente en otro apartado, es que cambia las piezas cuando realmente llegan al final

de su vida útil, lo que puede traducirse como un ahorro económico y una disminución de las paradas en las máquinas [6].

2.2.2. Tendencias del mantenimiento industrial en el siglo XXI

Aunque cambiemos de siglo, todos los métodos de mantenimiento mencionados anteriormente siguen siendo totalmente válidos. En este siglo se ha legislado para que el mantenimiento industrial se ajuste a las nuevas políticas sobre Seguridad e Higiene en el Trabajo y a las de Medio Ambiente [8]. Además, se está trabajando, en la medida de lo posible, en la optimización de los métodos y las combinaciones formadas por varios de ellos. Lo novedoso que aporta el siglo XXI son nuevas formas de entender el mantenimiento industrial, nuevas filosofías. Destacan dos filosofías, RCM (*Reliability Centered Maintenance*) y TPM (*Total Productive Maintenance*) [4].

El RCM o MBF (Mantenimiento Basado en la Fiabilidad) es una tecnología usada para determinar el mantenimiento idóneo de las máquinas y equipos en su contexto operacional, buscando una mayor fiabilidad operativa, partiendo del análisis de los posibles fallos, sus modos de fallo y sus repercusiones [4].

El TPM, mantenimiento integrado o productivo, fue desarrollado por la empresa japonesa Nippondenso, del grupo Toyota, en 1969, y empezó a implantarse en otros países a partir de 1980. Plantea que las tareas de mantenimiento son responsabilidad de toda la empresa y pretende trabajar hacia 0 fallos, 0 averías, 0 incidencias y 0 defectos. Este concepto está relacionado con los de calidad total y mejora continua. Al integrar a toda la empresa en las tareas de mantenimiento, se consigue un resultado final más enriquecido y participativo [6].

La siguiente figura (Figura 2.1) muestra, de forma orientativa, un resumen de todas las tendencias de mantenimiento mencionadas. Las del siglo XXI aparecen como cuarta generación.

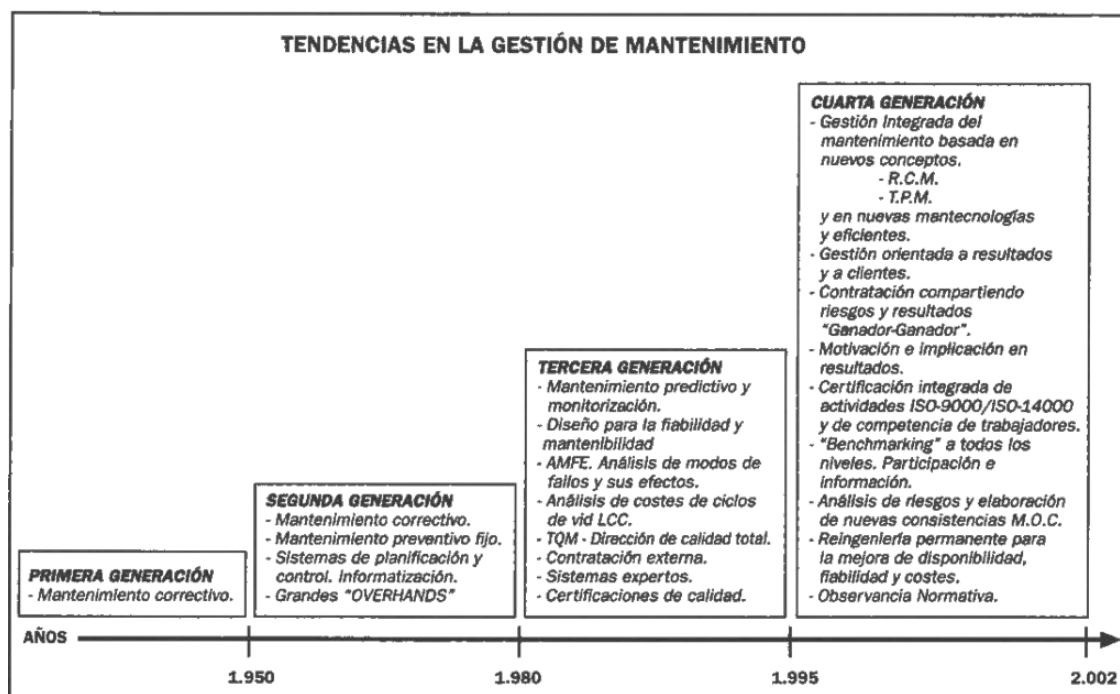


Figura 2.1: Tendencias del mantenimiento industrial desde el siglo XX [4].

2.2.3. Evolución del mantenimiento en ejes ferroviarios

En este proyecto interesa particularmente conocer la evolución del mantenimiento en ejes ferroviarios, como punto de partida para determinar si un método alternativo de mantenimiento sería adecuado y podría implantarse en el futuro. De esta manera, se podrán comparar las ventajas y los inconvenientes que presentan tanto los métodos de mantenimiento tradicionales como el alternativo que se pretende analizar.

Teóricamente, los ejes se diseñan para disponer de un tiempo de vida infinito. Pero lamentablemente, ciertos factores como daños superficiales, corrosión o rozamiento consiguen que esto no sea así. Lo que conduce a que los ejes se deban revisar periódicamente por seguridad.

El primer método que se utilizó para revisar los ejes (así como otros elementos mecánicos) de los trenes fue el denominado "*Tap test*", precursor de la prueba de ultrasonidos. Este método consistía en que cada vez que un tren paraba en la estación, un operario experto golpeaba con un martillo de mango largo las ruedas y según la nota que escuchaba decía si estaba sano o no. Este método fue utilizado hasta la década de los 60 del siglo XX inclusive, cuando empezó a ser sustituido por métodos más modernos [1].

En la actualidad, se recurre a técnicas de inspección no destructiva (NDT, *Non Destructive Testing*), dentro de un plan de mantenimiento preventivo. Según algunos autores [4,8], las NDT se engloban en la categoría de las técnicas de inspección en parada

del mantenimiento predictivo, pero en el sector ferroviario se utilizan como mantenimiento preventivo. Dichas técnicas son: la prueba de ultrasonidos (*ultrasonic testing*, UT), la Inspección de Partículas Magnéticas o prueba magnética (*magnetic particle testing*, MT), la prueba de corriente Eddy (*Eddy current testing*, ET; también conocido como *Foucault current method*) y pruebas visuales (*visual testig*, VT) [1].

Se realizan inspecciones periódicas, separadas por intervalos de tiempo basados en la experiencia y que garantizan la seguridad [1,6]. Concretamente, en las inspecciones se desmontan los ejes de los trenes y se someten, en general, a la prueba de ultrasonidos o a la de partículas magnéticas, aunque también se puedan usar otras pruebas. Es necesario desmontar los ejes porque, para aplicar estas técnicas, se debe acceder a las superficies. Una vez realizada la prueba si no se detectan defectos en el eje se vuelve a montar en el tren y si por el contrario se encuentran defectos se sustituye por uno nuevo y se repara.

A continuación, se muestran detalladamente las técnicas de ultrasonidos y partículas magnéticas, por ser las más empleadas.

2.2.3.1. Prueba de ultrasonidos:

En los ensayos por ultrasonidos se aplica un transductor de ondas ultrasónicas de impulsos de frecuencias entre 0,1 y 25MHz en el material [7]. Se mide el tiempo que las ondas ultrasónicas tardan en retornar al transductor, debido a la reflexión, desde el momento inicial.

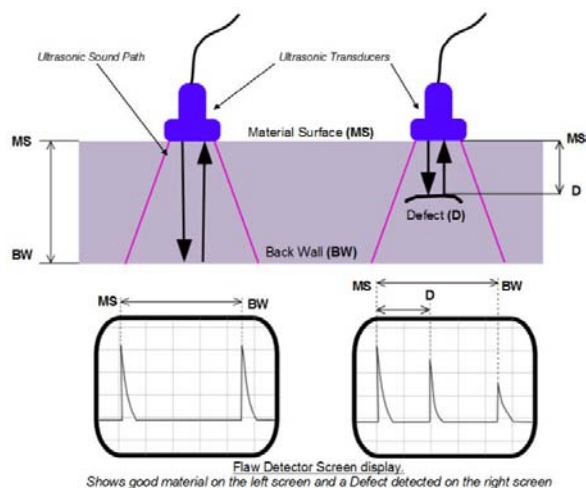


Figura 2.2: Aplicación de ultrasonidos a un espécimen [29].

Cualquier cambio en la impedancia acústica produce la reflexión de ultrasonidos o eco. Esta característica se utiliza para identificar discontinuidades internas en el material, como se aprecia en la Figura 2.2. Es un método de detección de discontinuidades muy sensible, salvo en zonas de cambio de sección, donde resulta poco fiable.

Las pruebas por ultrasonido son más rápidas y económicas que un examen radiográfico.

Para comprobar la eficacia de esta técnica detectando defectos, se recurre a las POD curves (*Probability of Detection curves*). El resultado más importante de estas curvas es que la detección del defecto depende más de la profundidad que de la forma del mismo [1]. La curva POD ideal (Figura 2.3) tiene una probabilidad de detección igual a cero cuando no hay defecto e igual a uno en caso de que exista defecto.

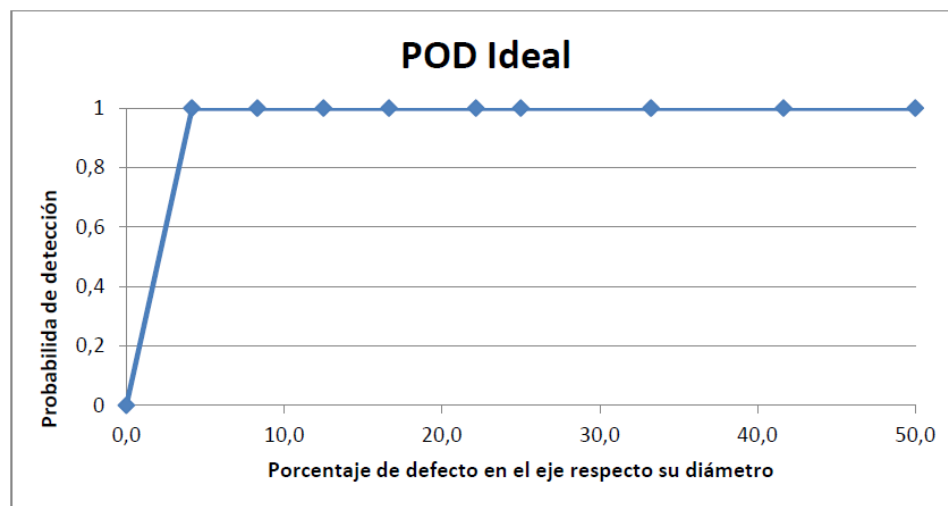


Figura 2.3: Ejemplo de curva POD ideal [3].

2.2.3.2. Inspección de Partículas Magnéticas o prueba magnética [7]:

Se utiliza en la detección de discontinuidades, en la superficie o muy cercanas a la superficie, de materiales férricos. El método de ensayo implica la aplicación de un campo magnético externo o la aplicación de corriente eléctrica a través del material que a su vez produce el flujo magnético en el material. La presencia de una superficie con discontinuidades provoca una distorsión en el flujo magnético que a su vez provoca la fuga de los campos magnéticos en la discontinuidad. Las partículas magnéticas son atraídas por el campo en el área de superficie de la discontinuidad y se adhieren a los bordes de la discontinuidad (Figura 2.4).

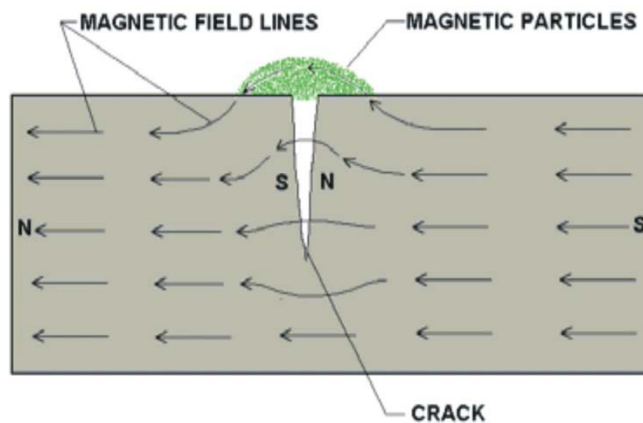


Figura 2.4: Prueba de Partículas Magnéticas [7].

Este método de ensayo no se puede utilizar para materiales no ferrosos y materiales no magnéticos ferrosos tales como aceros inoxidables austeníticos. Además es difícil automatizar el ensayo.

2.3. Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo se conoce también con los nombres de mantenimiento según condición o estado, control según condición o estado, monitorización de estado, *condition based maintenance* y *condition monitoring*. Estos términos se pueden emplear, de manera equivalente a mantenimiento predictivo, siempre que se refieran a la comprobación continua del estado de una máquina en funcionamiento mediante el control de un parámetro o variable significativa.

Como se ha explicado anteriormente, el mantenimiento predictivo se basa en el seguimiento o la monitorización y el control de uno o varios parámetros físicos representativos del estado de una máquina o un equipo, con el fin de detectar cualquier síntoma de fallo antes de que se produzca, para poder tomar las medidas necesarias con tiempo suficiente. La consideración principal que justifica este método es, que la mayoría de los fallos se producen lentamente y antes de que se produzcan suelen presentar indicios evidentes de un futuro fallo.

Algunos de los parámetros frecuentemente utilizados son: la temperatura, la presión, la velocidad lineal, la velocidad angular, la resistencia eléctrica o los ruidos y vibraciones.

Las ventajas que presenta este método [8] se resumen en:

- Permite registrar la historia del parámetro analizado (muy útil ante fallos repetitivos).

- Permite programar la reparación junto con la parada programada del equipo, antes de que se produzca un fallo, disminuyendo las intervenciones de mantenimiento.
- Permite reducir el número de piezas sustituidas innecesariamente con carácter preventivo.
- Posee una mayor eficiencia y flexibilidad que otros tipos de mantenimiento.

Por el contrario, tiene los siguientes inconvenientes desde el punto de vista de la monitorización:

- No todas las causas de fallo pueden ser detectadas con antelación, por lo tanto hay casos en los que no se puede monitorizar el estado.
- Es costoso tanto en mano de obra como en equipos.

Antes de implantar el mantenimiento predictivo monitorizando un parámetro, se debe plantear si el coste de monitorización es inferior a la reducción esperada en los costes de la mano de obra de mantenimiento y de la indisponibilidad, o si la seguridad personal es relevante. En caso de que estas suposiciones sean afirmativas, será beneficioso aplicar dicha monitorización.

Dentro del mantenimiento predictivo se distinguen dos grandes clases [8]. Por un lado, se encuentra el que se realiza sin interrupción del funcionamiento de la máquina o equipo, permitiendo la monitorización de un parámetro. Se denomina técnica de control en marcha. Por otro lado, el que requiere la parada del equipo, o al menos alejarse de sus condiciones normales de funcionamiento. Éste no se monitoriza pero se realiza un seguimiento periódico del parámetro. Es conocido como técnicas de control en parada.

Las técnicas de control en marcha engloban la inspección visual, acústica y al tacto de componentes accesibles; el control de la temperatura; el control del lubricante; la detección de pérdidas; el análisis de vibraciones; el control de ruidos; el control de corrosión; y el análisis espectral de corriente, entre otras.

Por su parte, las técnicas de control en parada están compuestas por la inspección visual, acústica y al tacto de las partes móviles o inaccesibles; la detección de fisuras mediante ensayos de líquidos penetrantes, partículas magnéticas, resistencia eléctrica, corrientes inducidas, ultrasonidos o examen radiográfico; la detección de fugas; el ensayo de vibraciones o el control de corrosión.

A continuación se muestra una tabla con algunas de las aplicaciones de estas técnicas (Tabla 2.1):

TÉCNICAS PREDICTIVAS MÁS USUALES, VARIABLES IDENTIFICATIVAS Y EQUIPOS O INSTALACIONES DE APLICACIÓN		
<i>VARIABLE IDENTIFICADORA</i>	<i>TÉCNICAS DE DIAGNOSIS</i>	<i>TIPO DE INSTALACIÓN O EQUIPO</i>
Vibraciones	Medición de vibraciones Impulsos de choque Analizador de frecuencias	Maquinaria rotativa
Viscosidad, partículas y degradación de lubricantes	Monitorización del color Oxidación Análisis espectroquímicos	Reductores Cajas de cambio Motores térmicos Compresores
Temperatura	Termografía Pintura térmica Adhesivos de bandas	Sistemas estáticos, térmicos, eléctricos y electrónicos
Valor óhmico y capacidad	Medida de resistencia Ondas de choque Corrientes de absorción, conducción y reabsorción	Motores eléctricos
Fugas	Detectores de ultrasonidos Gases halógenos Líquidos coloreados Detectores de grietas	Depósitos y tuberías
Grietas/Fisuras	Fluido magnético Resistencia eléctrica Corrientes inducidas Ondas ultrasónicas Ondas de radiación	Estructuras metálicas Equipos estáticos
Ruidos	Estetoscopio Radioscopio	Maquinaria rotativa
Corrosión	Ultrasonidos Detector de gas Radioscopio, magnetoscopio	Depósitos, tuberías, cráteres, calderas, etc.
Obstrucciones	Radioscopio Indicador de Presión	Tuberías, válvulas, depósitos, racores
Deformaciones	Escalas Indicadores de nivel Teodolitos	Tuberías

Tabla 2.1: Técnicas predictivas más usuales [4].

2.4. Mantenimiento predictivo basado en análisis de vibraciones

Este método es el que realmente nos interesa para este proyecto, porque ha demostrado ser el más efectivo para máquinas rotativas. Cabe destacar que es uno de los métodos en los que más se ha avanzado en los últimos años.

El fundamento de este método es que todas las máquinas, por muy perfectas que sean, vibran en funcionamiento. La vibración se produce en los elementos rotativos no equilibrados y en las aceleraciones de los componentes con movimiento rectilíneo. A su vez, los componentes que se mueven, rozan o giran sobre elementos adyacentes generan vibraciones debido a la rugosidad de las superficies de contacto. Las holguras en el ajuste entre componentes en contacto producen impactos. Los componentes de los cojinetes de apoyo, sometidos a esfuerzos cíclicos se deforman bajo carga y por tanto también transmiten vibraciones [8]. Dicha vibración almacena gran cantidad de información que puede ser útil para conocer el estado de la máquina. De esta manera, si nos centramos en la vibración, mediante una eficaz base de datos y análisis de tendencias, se puede deducir el estado en que se encuentra la máquina y programar una intervención cuando las condiciones de deterioro han pasado de un determinado punto y antes de que se llegue a producir la avería [4].

2.4.1. Caracterización de defectos a partir de señales vibratorias

Muchos problemas mecánicos se pueden reconocer inicialmente debido a un cambio en la amplitud de la vibración que produce la máquina. Con el fin de emitir un diagnóstico correcto acerca de la caracterización de las señales vibratorias de maquinaria rotativa, es esencial conocer previamente el cambio que producen los defectos más comunes en el comportamiento de dichas señales. Los defectos más comunes en maquinaria rotativa son: desequilibrio de masa, desalineamiento, holguras mecánicas, curvatura de ejes, efecto giroscópico, golpeteo de engranajes, rozamiento del rotor, excitaciones eléctricas, excitaciones externas, remolino de aceite, latigazo de aceite, fricciones internas y resonancias [5].

Los tres primeros defectos mencionados son los realmente interesantes, por intervenir en la mayoría de problemas mecánicos de ejes.

2.4.1.1. *Desequilibrio*

Este defecto tiene lugar cuando el centro geométrico de cualquier sección transversal rotativa no coincide con el centro de masas, así que, el eje de giro tampoco coincide con el eje principal de inercia que atraviesa la sección. Como consecuencia, aparece una vibración en la máquina. Esta

vibración es muy común, porque debido a las tolerancias de ensamblaje, de la construcción y de la propia anisotropía del material, se produce siempre cierto desequilibrio con carácter permanente.

En el espectro de frecuencia (ver Figura 2.5), el desequilibrio aparece como un pico en la frecuencia correspondiente a la velocidad de giro de la máquina (1x rpm). Cuanto mayor es este defecto, mayor es también la amplitud de la frecuencia, que aumenta proporcionalmente con el cuadrado de la velocidad de rotación. Además la amplitud en sentido radial es mayor que en sentido axial del eje.

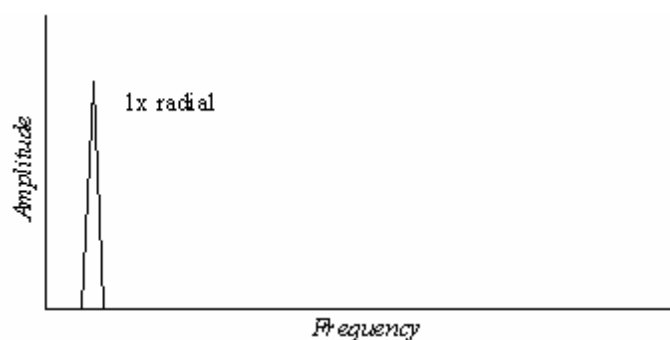


Figura 2.5: Ejemplo del espectro de frecuencia típico del desequilibrio [6].

2.4.1.2. Desalineamiento

Es otro defecto muy corriente por la dificultad que supone alinear dos ejes y sus rodamientos (ver Figura 2.6) de forma que no se originen fuerzas que produzcan vibraciones.

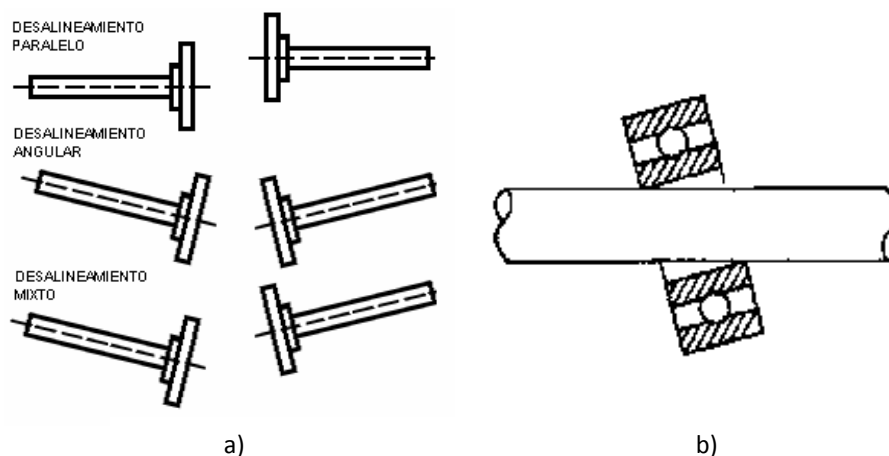


Figura 2.6: a) Tipos de desalineamiento entre ejes. b) Desalineamiento entre eje y rodamiento [6].

El desalineamiento no es un fenómeno unidireccional como el desequilibrio, presenta distintos valores de amplitud según la dirección. Se manifiesta una alta vibración tanto en la dirección radial como en la axial. El espectro de frecuencia (ver Figura 2.7) se caracteriza por mostrar un pico a $2x$ rpm, cuyo valor es del orden de la mitad o superior a la magnitud de la componente $1x$ rpm.

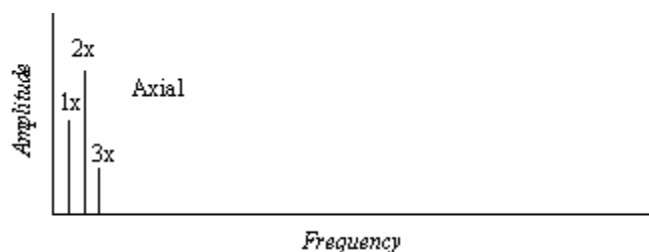


Figura 2.7: Ejemplo del espectro de frecuencia típico del desalineamiento [6].

2.4.1.3. Holguras

Los elementos estáticos de las máquinas sufren desajustes mecánicos, que originan un incremento de la respuesta del desequilibrio residual que tiene el rotor a la frecuencia $1x$ rpm, y del golpeteo que se produce a $2x$ rpm. Un desajuste de las piezas produce muchos armónicos, debido a la respuesta no lineal de las piezas flojas. En el espectro de frecuencia de la Figura 2.8 se observa como aparecen los armónicos correspondientes a $3x$ rpm, $4x$ rpm, etc.

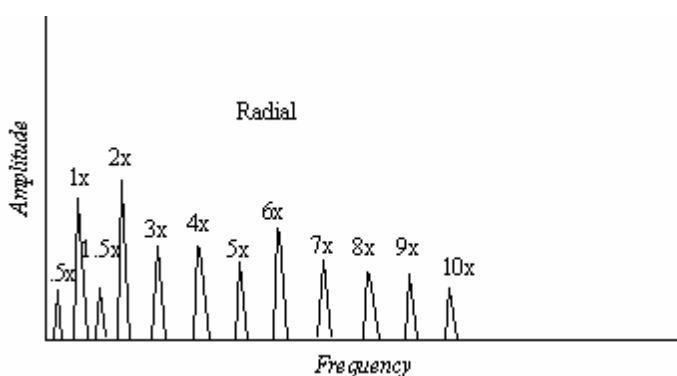


Figura 2.8: Ejemplo del espectro de frecuencia correspondiente a piezas desajustadas [6].

2.5. Procesamiento de señales en defectología

El procesamiento de señales en defectología pretende simplificar la información obtenida sin perder la que es relevante. Este apartado expone los principales métodos de análisis de vibraciones en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia, centrándose especialmente en los relativos al dominio del tiempo y la frecuencia.

En primer lugar, en el dominio del tiempo interesa obtener una serie de parámetros que permiten conocer la estadística descriptiva de la señal de vibración. Dichos parámetros son los siguientes:

- Media: promedio aritmético de todos los datos de la muestra.
- Desviación estándar: raíz cuadrada del promedio de la suma de los cuadrados de la señal menos su media.
- Valor eficaz: raíz cuadrada del promedio de la suma de los cuadrados de la señal.
- Valor de pico: la mitad de la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo de la señal.
- Kurtosis: medida relacionada con la cantidad y la amplitud de picos presentes en la señal. Aumenta cuando crece el número de picos o su amplitud.

A partir de estos parámetros se determina la centralización, la dispersión y la forma de la señal. Además, la desviación estándar y la kurtosis predicen defectos en elementos estructurales [2].

En segundo lugar, el análisis de la frecuencia se utiliza tradicionalmente para la detección de fallos, debido a que la presencia de un defecto desplaza o modifica la amplitud de los picos de frecuencia de una señal. Destaca en este campo la transformada de Fourier como técnica más utilizada.

Por último, en este proyecto interesa fundamentalmente la transformada Wavelet, dado que combina el dominio del tiempo y el de la frecuencia.

A continuación se detallan la transformada de Fourier y la transformada Wavelet.

2.5.1. Transformada de Fourier

La transformada de Fourier es una herramienta matemática que permite conocer las componentes en frecuencia de una señal mediante el cálculo de los coeficientes de correlación de la señal con distintas funciones sinusoidales [11]. La Transformada de Fourier $X(f)$ de una señal $x(t)$ se escribe como muestra la Ecuación 2.1.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-i2\pi ft} \cdot dt \quad (2.1)$$

El mayor inconveniente de este método, es que no permite localizar efectos transitorios ya que trabaja en el dominio de la frecuencia y no del tiempo. Por eso, se suele necesitar que la función que transforma sea periódica. Se puede emplear la Transformada de Fourier con señales no periódicas si se tratan éstas como señales periódicas de periodo infinito. Alternativamente, se puede dividir la señal en partes asumibles como estacionarias, mediante la Transformada Rápida de Fourier [10].

A la hora de calcular la Transformada de Fourier de series temporales, aparecen sumatorios infinitos que no se pueden resolver directamente por ordenador. Con el fin de solucionarlo, se define la Transformada Discreta de Fourier. Esta transformada permite obtener componentes de frecuencia a partir de componentes en el tiempo, con operaciones en el campo complejo. Además, relaciona una función temporal periódica obtenida por muestreo con una función muestreada en frecuencia y periódica [12].

La Transformada Rápida de Fourier es una herramienta matemática que utilizan los equipos de cálculo, para aplicar la transformada discreta de Fourier eficientemente. Se consigue reducir el número de operaciones de N^2 a $N \cdot \log_2 N$ [11]. A pesar de esto, el uso de la transformada rápida de Fourier puede inducir los errores de aliasing, efecto empalizada y ventana temporal.

2.5.1.1. *Aliasing*

El aliasing es un error que se puede cometer al reconstruir una señal si no se considera con cuidado la frecuencia de muestreo de la señal (f_s). Dicha frecuencia, limita la frecuencia máxima hasta la cual se puede reconstruir la señal. Según el teorema de Nyquist la frecuencia de muestreo debe ser mayor o igual que el doble de la máxima frecuencia existente en la señal (Ecuación 2.2) [2]:

$$f_s \geq 2 \cdot f_{max} \quad (2.2)$$

En la Figura 2.9 se observa el efecto que produce el aliasing. La señal reconstruida aparece en azul y la original en rojo.

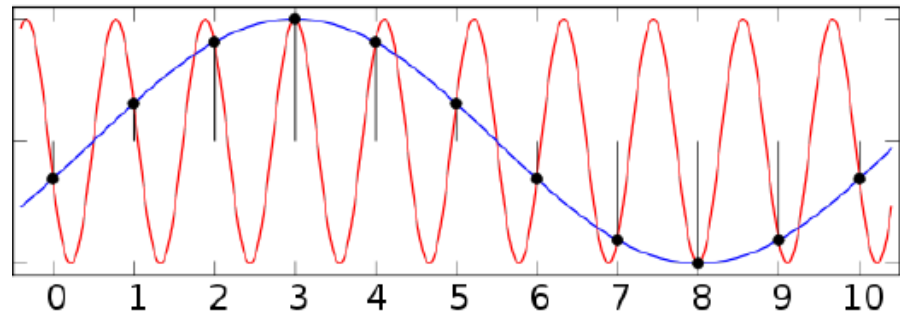


Figura 2.9: Aliasing [2].

Este error se puede corregir añadiendo un filtro “antialiasing”, que elimina cualquier frecuencia superior a la mitad de la frecuencia de muestreo.

2.5.1.2. Efecto empalizada

Al utilizar la transformada rápida de Fourier se calcula el espectro en intervalos de frecuencia discretos, lo que puede provocar la pérdida de la amplitud y frecuencia reales. Este error en la percepción de la señal se conoce como empalizada [3].

El espacio entre las líneas de frecuencia (o resolución en frecuencia- Δf) se determina a partir de la expresión (Ecuación 2.3):

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (2.3)$$

Para mejorar la resolución en frecuencia (Δf), existen dos opciones: disminuir la frecuencia de muestreo (f_s) o aumentar el número de líneas de la señal (N).

2.5.1.3. Ventana temporal

Este error puede surgir si se supone que la señal analizada es periódica en el tiempo de registro obtenido. En la Figura 2.10, se muestra claramente el error que se produce.

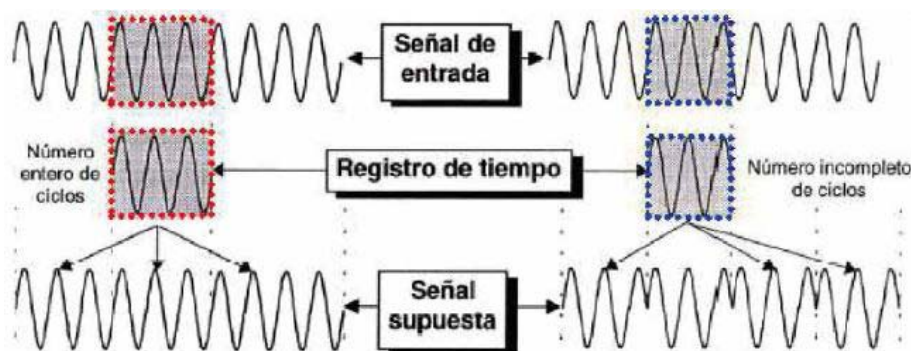


Figura 2.10: Error de ventana temporal [2].

La solución es utilizar una ventana espectral, que consiste en multiplicar la señal adquirida por una ventana que reduzca la influencia de ciertas partes de la señal, generalmente, los extremos, como ocurre en la ventana Hanning o Blackman. La aplicación de estas ventanas ha hecho posible el tratamiento de señales no estacionarias con Fourier, constituyendo la llamada transformada de Fourier en tiempo corto.

2.5.2. Transformada Wavelet

La transformada Wavelet proporciona información tanto del dominio del tiempo como de la frecuencia, eliminando así los problemas que arrastraba la transformada de Fourier. Por esta razón, esta transformada es una herramienta idónea para señales no estacionarias como las estudiadas en este proyecto.

En el caso de la transformada de Fourier, se obtienen los coeficientes de correlación de la señal estudiada con una senoide, sin embargo, con la transformada Wavelet se obtienen los coeficientes de correlación entre la señal y una función seleccionada denominada Wavelet madre, dependiendo del resultado de la escala y posición de esta función. Existen numerosos tipos de familias distintas de Wavelets madre, entre las que cabe destacar la Daubechies, Coiflet, Symlet, Morlet o Meyer [9]. Algunos ejemplos de funciones Wavelet pertenecientes a estas familias se pueden observar en Figura 2.11.

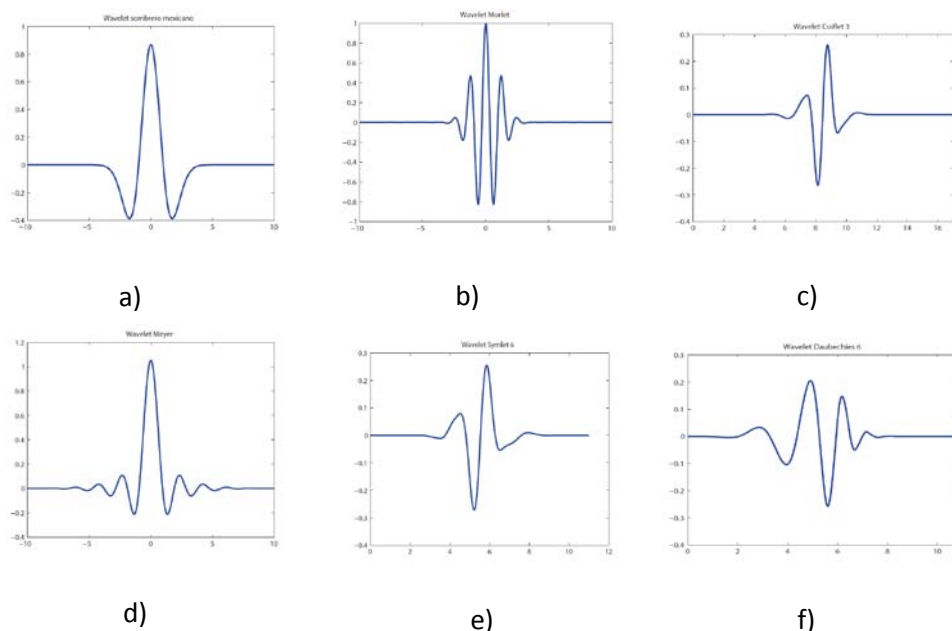


Figura 2.11: Familias Wavelets más utilizadas como Wavelet madre: a) Wavelet Sombrero Mexicano. b) Wavelet Morlet. c) Coiflet 3. d) Wavelet Meyer. e) Symlet 6. f) Wavelet Daubechies 6 [2].

2.5.3. Transformada Wavelet continua

Esta transformada permite analizar las señales a través de los coeficientes de correlación, en lugar de utilizar la señal entera. La expresión matemática que la define aparece en la ecuación 2.4.

$$T(a, b) = w(a) \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2.4)$$

Donde (t) es la señal temporal, ψ es la función Wavelet madre, y (a) es una función de pesos. Respecto a la Wavelet madre, b es el factor relativo a la posición y a a la escala. $(a,)$ son los coeficientes resultantes, que son funciones de a y b . El producto del conjugado de la Wavelet madre con la señal es integrado en el rango total de la señal. Esta operación se conoce matemáticamente como convolución [14].

2.5.4. Transformada Wavelet discreta

La transformada Wavelet discreta supone un gran avance en términos de computación y eficacia respecto a la transformada Wavelet continua. Lo consigue trabajando, en mayor medida, con medidas discretas como es el caso de las medidas de vibración.

El principal método para discretizar la señal de la transformada Wavelet continua es emplear la rejilla diádica como variable de escala, resultando $a=2^k$, como refleja la ecuación 2.5.

$$T(2^k, b) = \frac{1}{2^k} \sum_0^N x(i) \psi^* \left(\frac{i-b}{2^k} \right) \quad (2.5)$$

Cada valor de k se denomina octava, y consiste en cada uno de los niveles en los que se descompone la señal (nivel de descomposición). Las escalas bajas tienen en cuenta las frecuencias bajas, y las escalas altas las frecuencias mayores [15].

Existen distintos procedimientos para descomponer la señal. Uno de los más habituales, conocido como diezmado, descompone la señal en un número de coeficientes proporcional a la escala analizada. Con esto, consigue que las frecuencias menores de una señal necesiten menos coeficientes para ser representadas.

Otro procedimiento muy utilizado, sobre todo en ingeniería, es la transformada wavelet discreta, optimizada con filtros digitales, que genera información por bandas de frecuencia. Este método procesa una señal temporal discreta $x(i)$, descomponiéndola en información de aproximación (A) mediante un filtro paso bajo e información detalle (D) mediante un filtro paso alto, tal y como aparece en la Figura 2.12.

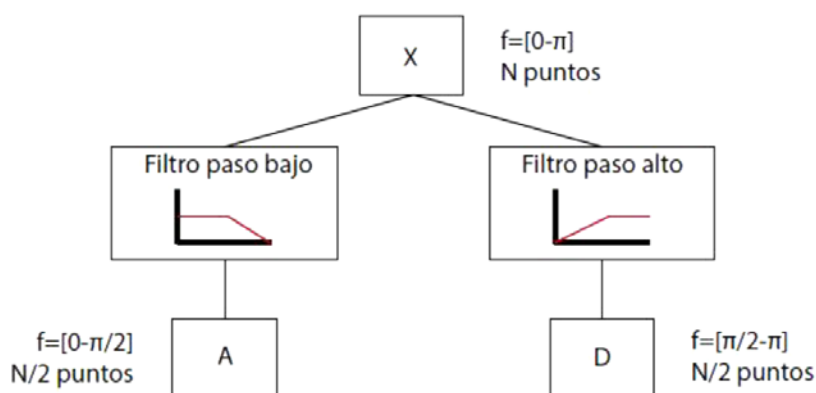


Figura 2.12: Descomposición de una señal mediante Transformada Wavelet discreta en información de aproximación (A) y de detalle (D) [2].

2.5.5. Análisis multiresolución

EL análisis multiresolución aplica la transformada Wavelet discreta hasta un nivel de descomposición determinado, descomponiendo únicamente la información de las señales de aproximación en bandas de frecuencia, tal y como aparece en la Figura 2.13.

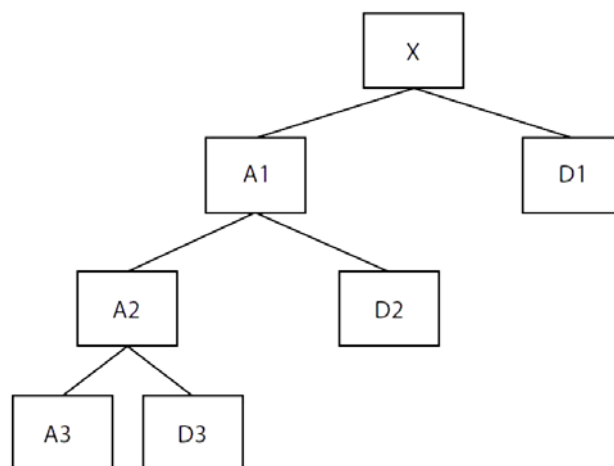


Figura 2.13: Procedimiento de descomposición hasta nivel 3 con análisis multiresolución [2].

2.5.6. Transformada en paquetes Wavelet

Esta transformada es la que se utiliza en este proyecto. La transformada en paquetes Wavelet incorpora al análisis multiresolución la descomposición de la señal detalle hasta el nivel deseado y con las mismas medidas se puede obtener información relativa a frecuencias más altas.

Por ejemplo, si las muestras experimentales estaban formadas por 40.000 datos y fueron tomados a una frecuencia de muestreo de 5.000Hz el primer nivel de descomposición estará formado por dos señales de 20.000 datos (coeficientes Wavelet): una de las señales estará comprendida entre 0 y 1.250Hz y la otra entre 1.250 y 2.500Hz. Los rangos de frecuencia van de 0 a 2.500Hz y no de 0 a 5.000Hz debido al Teorema de Nyquist. El cual demuestra que para que la reconstrucción de una señal periódica continua en banda base a partir de sus muestras sea posible, la señal debe estar limitada en banda y la tasa de muestreo debe ser superior al doble de su ancho de banda. Por lo tanto, de esta forma, se realiza otro nivel de descomposición, y se obtendrá el segundo nivel con cuatro señales de 10.000 coeficientes Wavelet estando comprendidos en los siguientes intervalos de frecuencia: 0 – 625Hz, 625 – 1250Hz, 1250 – 1875Hz y 1875 – 2500Hz [16].

En la siguiente imagen (Figura 2.14) se observa el procedimiento de descomposición. El término (k,j) representa los coeficientes de un paquete, donde k es el nivel de descomposición (el número resultante de paquetes es $2k$) y j es la posición del paquete dentro del nivel de descomposición.

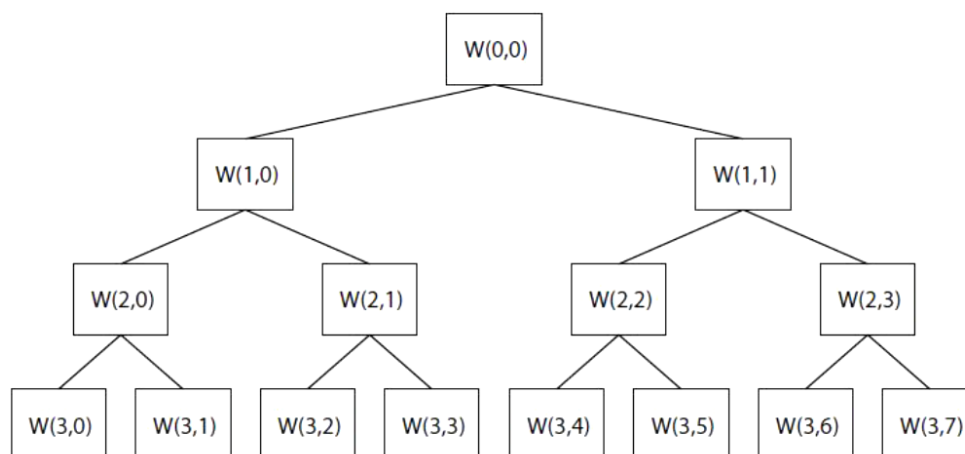


Figura 2.14: Procedimiento de descomposición hasta nivel 3 con transformada en paquetes Wavelet [2].

2.5.6.1. Contenido de frecuencia en la transformación en paquetes Wavelet

La frecuencia hasta la que se puede reconstruir la señal, a la que consideraremos π , es la mitad de la frecuencia de muestreo según el teorema de Nyquist. Teniendo en cuenta que las señales que se tratan pueden ser supuestas como periódicas y la propiedad de simetría, si se quiere obtener las frecuencias del intervalo $(\pi/T, 2\pi/T)$, el resultado es la imagen simétrica de las frecuencias correspondientes al intervalo $(0, \pi/T)$.

En la transformada en paquetes Wavelet la señal pasa por una serie de filtros paso alto y paso bajo y en cada paso de la descomposición a la señal se le asignan unos coeficientes. Se aplican los filtros al intervalo $(\pi/2T, \pi/T)$, además del $(0, \pi/2T)$ que ya se le aplicaba en la transformada Wavelet. Cuando se aplican los filtros a esta nueva parte las frecuencias altas y bajas aparecen cambiadas ya que las frecuencias en este intervalo son las simétricas del primer intervalo como se ha explicado anteriormente. Debido a esto el orden de las frecuencias en la transformada en paquetes Wavelet está modificado [13]. Un ejemplo del desorden que experimentan las frecuencias se muestra en la Figura 2.15.

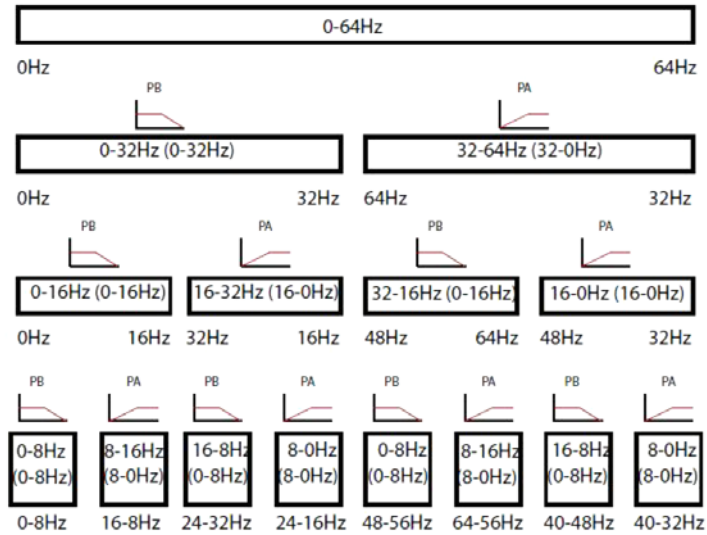


Figura 2.15: Ejemplo de descomposición de una señal mediante la transformada en paquetes Wavelet [2].

2.5.6.2. Energía de los paquetes Wavelet

La energía de un paquete j a nivel de descomposición k se obtiene mediante la suma de todos los cuadrados de sus coeficientes, según la Ecuación 2.6:

$$E(k, j) = \sum_i \{w_i(k, j)\}^2 \quad (2.6)$$

Comúnmente, se normaliza los valores de energía obtenidos dividiéndolos por la energía total de la señal. La energía total se calcula como la suma de la energía de todos los paquetes, de acuerdo a la Ecuación 2.7:

$$E_t = \sum_j E(k, j) \quad (2.7)$$

Por lo que los valores de energía normalizados resultan (Ecuación 2.8):

$$E(k, j_{rel}) = \frac{E(k, j)}{E_t} \quad (2.8)$$

Los resultados de energía de paquetes Wavelet de este proyecto no se han normalizado, así que se calculan mediante la Ecuación 2.6. De esta forma, el valor de la energía de un paquete no depende del valor de energía global de la señal. La razón por la que no se normaliza es, que se va a trabajar

con multitud de señales diferentes tomadas en diferentes instantes y, por tanto, en diferentes condiciones del entorno. Entonces, lo más probable es que el contenido de energía total E_t (parámetro de normalización) sea diferente en cada señal. Si no se evitara esta normalización podría ocurrir que efectos indeseables, como ruido u otros fenómenos, perturbaran innecesariamente el valor de las frecuencias de interés [2].

En la Figura 2.16 se muestra un ejemplo de energía de paquetes Wavelet, obtenida de una señal vibratoria tomada desde el alojamiento de un rodamiento sano de una máquina girando a 10Hz, utilizando el nivel de descomposición 3 [2].

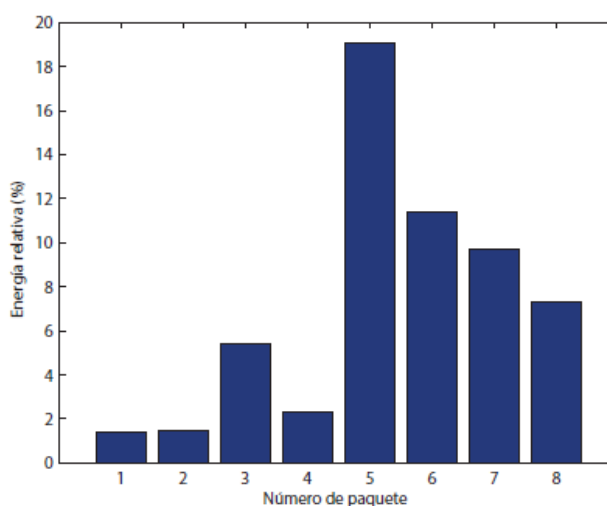


Figura 2.16: Energías relativas de una señal obtenida mediante la transformada en paquetes Wavelet a nivel 3 [2].

Capítulo 3

Sistema Experimental

El propósito de analizar el comportamiento de un eje con distintos niveles de defecto requiere de un proceso de adquisición y tratamiento de datos previo, así como la implementación de un sistema capaz de realizarlo eficaz y eficientemente.

Partiendo de un eje ferroviario a escala 1/8, que es el espécimen ensayado, al que se le practican fisuras de distintos tamaños en el cambio de sección, se obtienen en el banco de ensayos del laboratorio las mediciones necesarias a las velocidades demandadas (20, 40 y 60 Hz). En el presente capítulo se explica el sistema experimental utilizado, incluyendo el banco de ensayos, la cadena de medida y las condiciones de ensayos. Se detallará también el protocolo de ensayos y la base de datos generada.

3.1. Banco de ensayos

El banco de ensayos es una máquina de simulación de fallos, llamada ROTOKIT (ver Figura 3.1) de *SpectraQuest, Inc.*, que se encuentra fijada sobre una bancada. Tiene un motor con un dispositivo para regular las revoluciones a las que gira y una parte que sujeta al eje, que consiste en dos pletinas de sujeción y unos rodamientos modelo ER10 de la marca *Rexnord®* sobre los que gira dicho eje, para evitar fricciones. En la transmisión del giro del motor al eje se utiliza un acoplamiento flexible.



Figura 3.1: Banco de ensayos utilizado (ROKIT).

3.1.1. Motor

El motor (ver Figura 3.2) empleado en el banco de ensayos corresponde al modelo 56T34F5301 J de la empresa Marathon®.

Es un motor convencional cuyas características se muestran en la Tabla 3.1.



Figura 3.2: Motor del banco de ensayos utilizado [3].

Potencia	246W
Velocidad	3600 rpm
Rendimiento	67,5 %
Peso	10 kg
Frecuencia nominal	60/50 Hz, 190/380 voltios
Par variable, par constante en el rango de velocidad 10:1	
Aislamiento de clase F	
Factor de servicio 1.15 de onda sinusoidal	
Robusta estructura de acero	
Atornillado sobre base rígida desmontable	
Apto para montaje horizontal o vertical	
Apto para trabajar en ambientes sucios o polvorientos	

Tabla 3.1: Características del motor [19].

3.1.2. Variador de Frecuencia

El variador de frecuencia sirve para regular las revoluciones a las que gira el motor. El elegido en este caso ha sido el VFD 007S21B de Delta® (Ver Figura 3.3).



Figura 3.3: Variador de frecuencia.

Es importante destacar que con este aparato seleccionamos la velocidad de giro del motor pero no la del eje, porque al transmitir la velocidad del motor al eje se produce un deslizamiento inevitable que impide al eje alcanzar la velocidad del motor.

A continuación se muestran las características más relevantes en la Tabla 3.2.

Salida máxima aplicable para el motor (kW)		0,75
Características de salida	Capacidad de salida nominal (kVA)	1,6
	Corriente de salida nominal (A)	4,2
	Tensión máxima de salida (V)	3 fases proporcional al voltaje de entrada
	Frecuencia de salida (Hz)	0,1-400
	Frecuencia del transportador (kHz)	3-10
Características de entrada	Corriente de Entrada (A)	Monofásico / Trifásico 9,7/5,1
	Monofásico (corriente de entrada trifásica)	5,1
	Voltaje/Frecuencia	Monofásico / Trifásico 200-240 V, 50/60 Hz
	Tolerancia de tensión	±10% (180-264 V)
Tolerancia de frecuencia		±5% (47-63 Hz)
Método de enfriamiento		Enfriamiento natural
Peso (Kg)		1,5

Tabla 3.2: Características del variador de frecuencia [20].

3.1.3. Espécimen ensayado

Como ya se ha comentado anteriormente el espécimen ensayado es un eje de ferrocarril a escala 1/8, al que se le practicarán distintos tamaños de fisura en el cambio de sección cercano a una rueda. Se puede observar el plano detallado del eje en la siguiente imagen (Figura 3.4).

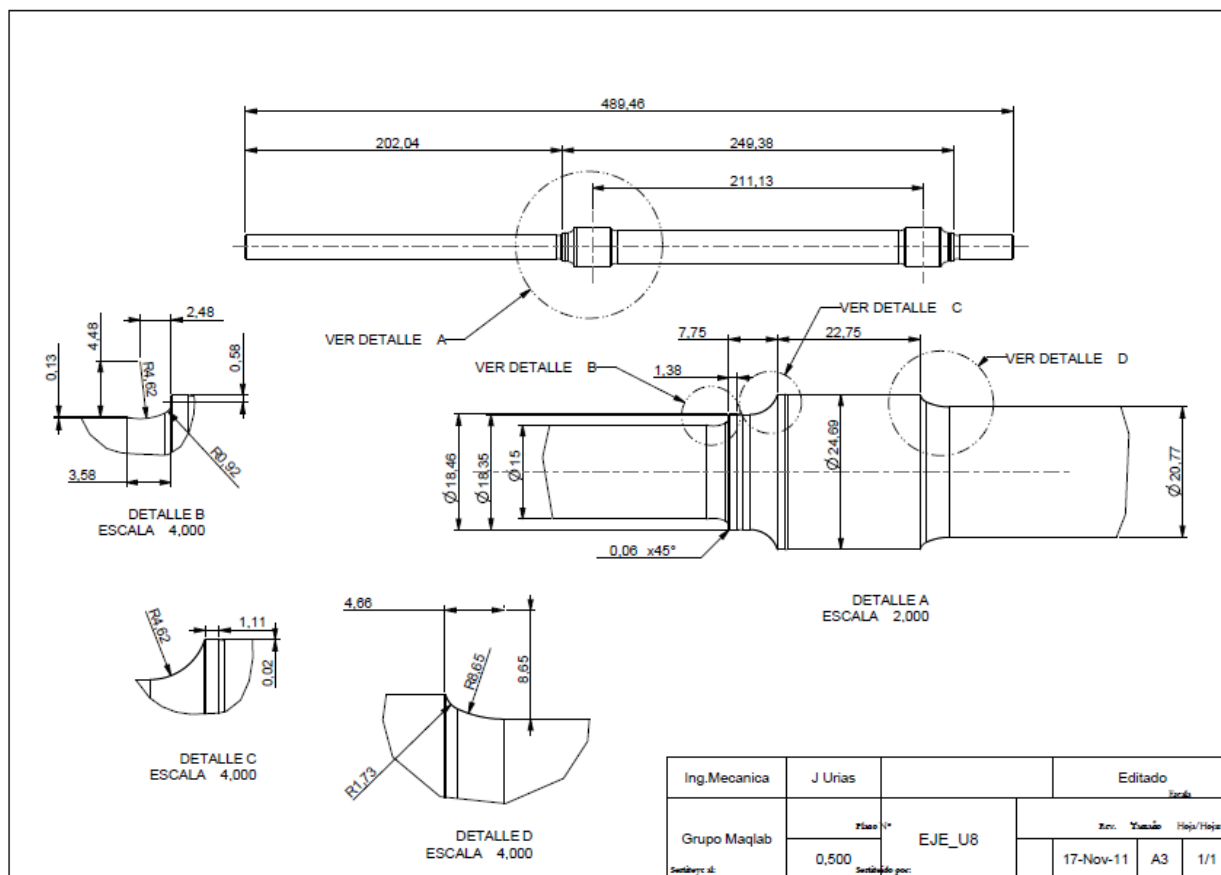


Figura 3.4: Plano del espécimen ensayado.

Algunas de las características del eje se muestran en la Tabla 3.3.

Material	Aluminio
Masa (Kg)	0,378
Coeficiente de amortiguamiento (Kg/s)	4,58
Rigidez (KN/m)	1544,3
Rho (ρ) (m)	2 e-5
Longitud efectiva (m)	0,26
Diámetro (m)	0,0207

Tabla 3.3: Características del espécimen ensayado [3].

3.2. Cadena de medida

La cadena de medida es el sistema por el cual obtenemos las mediciones requeridas. Se compone de una serie de elementos que se detallarán más adelante. En primer lugar, se necesita el espécimen ensayado que es el elemento mecánico a estudiar. Le sigue un acelerómetro, que es un transductor encargado de gestionar las señales vibratorias. Luego es necesario un elemento acondicionador de las señales recibidas para conseguir una correcta adquisición de mediciones. A continuación, se encuentra una tarjeta de adquisición de datos que se conecta mediante un puerto USB al ordenador. Por último, en el ordenador, mediante el software Btool [21], desarrollado en *Matlab*®, se recopilan todas las mediciones para su posterior análisis.

Se puede resumir todo el proceso con la siguiente imagen (Figura 3.5):



Figura 3.5: Cadena de medida [3].

3.2.1. Acelerómetro

La función desempeñada por el acelerómetro consiste en transformar las perturbaciones recibidas del eje en señales eléctricas, proporcionales a dichas perturbaciones, que puedan ser procesadas.

Para el caso que nos ocupa, el acelerómetro elegido se trata de uno piezoeléctrico y uniaxial, modelo KD37v de *MMF* (Ver Figura 3.6).

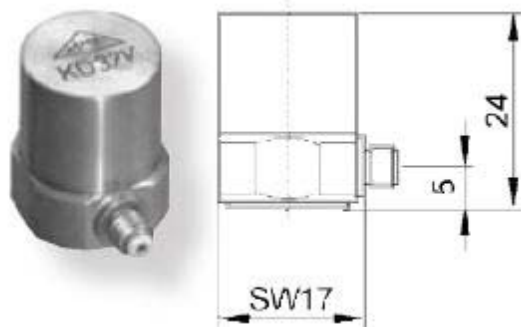


Figura 3.6: Acelerómetro.

El acelerómetro se coloca sobre la pletina más próxima al motor en el extremo más alejado según se mira el montaje, como se aprecia en la Figura 3.7. Esta posición es la que, experimentalmente, ha dado menos problemas a la hora de conseguir las señales. Como precaución, el cable que sale del acelerómetro no debe tocar ningún elemento metálico del montaje.

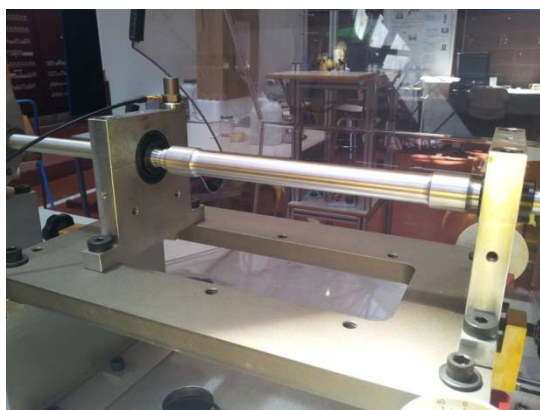


Figura 3.7: Sistema ROTOKIT con acelerómetro instalado.

También se cuenta con un tacómetro para comprobar si hay deslizamiento en el eje.

3.2.2. Acondicionador

La señal eléctrica proveniente del acelerómetro pasa a un acondicionador de señal modelo M32 de *MMF* que se encarga de amplificar, filtrar y adecuar la señal para su adquisición (Figura 3.8).



Figura 3.8: Acondicionador de señal.

Este acondicionador está especialmente recomendado para transductores con salida IEPE y estas aplicaciones o similares. Algunas de sus características son: proporcionar la

fuelle de alimentación necesaria para el circuito electrónico del sensor, ofrecer tres rangos de ganancia y un filtro paso bajo conectable o poder usarse como interfaz para PC's basados en sistemas de adquisición de datos [22].

3.2.3. Tarjeta de adquisición

Una vez acondicionada la señal, se transmite a la tarjeta de adquisición Keithley (modelo KUSB-3100) que a su vez envía los datos al ordenador mediante una conexión USB (ver Figura 3.9).



Figura 3.9: Tarjeta de adquisición Keithley KUSB-3100.

Una ventaja de la tarjeta Keithley es que ofrece una protección para el ordenador por picos de tensión, sobrecarga o cortocircuito mediante un aislamiento de 500V que permite que el sistema operativo realice su trabajo sin interrupciones y de forma continua [23].

La tarjeta de adquisición se ocupa de digitalizar las señales analógicas. Debemos tener en cuenta con qué tipo de señal analógica estamos trabajando para seleccionar la frecuencia de muestreo adecuada y evitar que se produzca el efecto Aliasing. Las señales que tratamos se pueden considerar como aleatorias de tiempo discreto. Teniendo en cuenta el teorema de Shannon-Nyquist y suponiendo que con 3000Hz se podría reconstruir totalmente la señal, se puede seleccionar una frecuencia de muestreo de 6000Hz.

3.2.4. Software

El ordenador adquiere los datos mediante un software específico denominado BTOOL [21], que ha sido realizado en *Matlab*®. Esta herramienta permite seleccionar el número de ciclos que se desea de los ensayos, así como el tiempo de espera entre ciclos, siempre que lo ejecutemos en modo automático para permitir que adquiera datos.

3.3. Condiciones de ensayo

Para disminuir la dispersión de los resultados experimentales obtenidos a partir del espécimen estudiado (eje ferroviario de aluminio a escala 1/8 con distintos niveles de

fisura en el cambio de sección), es necesario determinar unas pautas comunes en todos los ensayos.

En primer lugar, se emplea el mismo espécimen durante todos los ensayos, pero se incrementa progresivamente el nivel de fisura.

En segundo lugar, se hace girar al eje sometido únicamente a la acción de su propio peso, es decir, sin cargas externas.

En tercer lugar, la adquisición de datos se realiza en estado estacionario, por tratarse de un estado más representativo del funcionamiento del eje que el arranque o la parada.

Por último, se ensaya el eje a las velocidades de giro de 20, 40 y 60Hz (1200, 2400 y 3600 rpm), en ese orden dos veces. Estas velocidades son representativas del funcionamiento nominal de la máquina. Cada velocidad se estudia de manera independiente. Con esta variación en las velocidades se pretende comprobar el efecto que produce aumentar o disminuir la velocidad.

3.3.1. Defectos a estudiar

Como se ha comentado anteriormente, el espécimen ensayado presenta distintos niveles de fisura. Se parte de un eje sano sin defectos y se le practica sucesivas fisuras a distintas profundidades en el cambio de sección. Se pretende con esto descubrir la influencia de los distintos niveles de defecto.

Los defectos que se presentan con mayor frecuencia en ejes son los superficiales en dirección transversal al eje, además son los más críticos y por eso son los que se estudian en este proyecto (Ver Figura 3.10).

Para este trabajo se han establecido nueve niveles de defecto que se detallan en la Tabla 3.4.

Nivel de defecto	Porcentaje de profundidad de fisura respecto al diámetro del eje
0	0% (Eje sano)
1	4,15%
2	8,30%
3	12,50%
4	16,65%
5	22,15%
6	25,00%
7	33,25%
8	41,65%
9	50,00%

Tabla 3.4: Niveles de defecto ensayados en el eje.

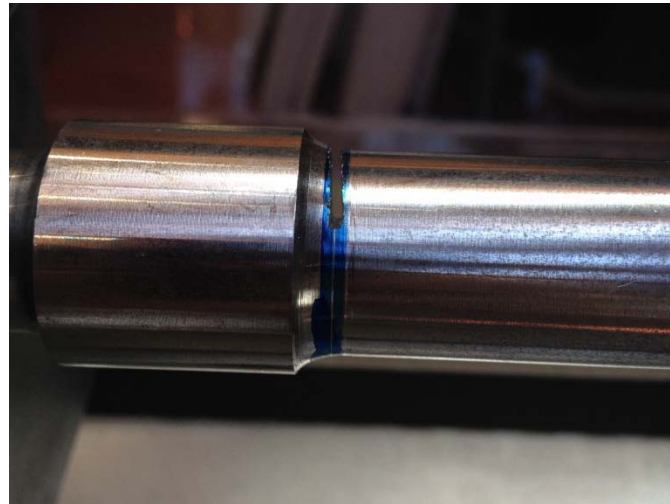


Figura 3.10: Detalle del defecto 7 en el eje.

3.3.2. Número de medidas a tomar

Es importante definir el número de medidas de vibración necesarias para conseguir un estudio fiable y representativo de todas las condiciones ensayadas en el eje. El criterio seguido para fijar un número de medidas se basa en el Teorema Central del Límite [25]. Este teorema indica que la suma de N variables aleatorias independientes de varianza finita e idéntica distribución tiende a la distribución normal cuando N es grande. Suponiendo una distribución normal, se puede estimar el error aleatorio E_r cometido al calcular la media global a través de N datos mediante la ecuación 11 [24]:

$$E_r = \sqrt{\frac{2}{N}} \quad (11)$$

Para este trabajo se estipuló que un número de 1000 medidas diferentes para cada condición de ensayo (nivel de defecto y velocidad), tenía un error aleatorio de 4,5% y podía considerarse admisible. En el caso particular de la condición de eje sano, se decidió disponer de 2000 medidas, por tratarse de la referencia de la comparación, con lo que en este caso se cometería un error del 3,2%.

La manera de llevar a cabo las 1000 medidas diferentes de vibración de cada condición ha consistido en adquirir señales consecutivamente en grupos de 100. Cada uno de estos grupos de medidas se toma de forma dispersa en el tiempo hasta completar las 1000 para cada nivel de defecto y velocidad (un total de 10 grupos para cada caso), y las 2000 en el caso de eje sano (un total de 20 grupos).

Se han cogido las 100 medidas de forma consecutiva para que se encuentren bajo las mismas condiciones ambientales y puedan, por tanto, ser promediadas. Interesa realizar este promediado porque así se reduce el elevado número de datos a analizar, facilitando el manejo de información. Además, el promediado se utiliza para eliminar aspectos no

periódicos y ruidos que puedan afectar a las medidas obtenidas. Los ruidos presentan un problema dado que las máquinas del banco de ensayo son muy sensibles y la más mínima perturbación externa produce este desagradable efecto. Se puede generar ruido muy fácilmente, desde el producido por el funcionamiento de otras máquinas cercanas hasta el producido por el simple hecho de tocar o apoyarse sobre la bancada del banco de ensayos.

Por último, se tiene que aclarar que el promediado se realiza sobre los funcionales en vez de sobre las señales vibratorias directamente. El que aplicaríamos sobre las señales vibratorias, por ser temporales, sería un promediado síncrono en el tiempo (TSA, del inglés Time Synchronous Average) [26]. La razón por la que no se aplica el promediado síncrono es que al llevar a cabo los ensayos es muy difícil sincronizar el inicio de todas las medidas, consiguiendo la misma posición angular del eje y las mismas condiciones en todos los casos, así que no tiene sentido emplearlo. Sin embargo, se puede trabajar con un promediado no síncrono en los funcionales, es decir, promediar después de haber eliminado la parte temporal y por eso es el método empleado.

3.4. Protocolo de medidas

Previo a la realización de cada sesión de medida, se debe cumplir el protocolo de medidas desarrollado por el Departamento de Ingeniería Mecánica. Este protocolo pretende garantizar la repetibilidad y reducir los errores que se puedan cometer. Los aspectos más representativos de dicho protocolo se indican a continuación:

- Comprobar el correcto montaje de la maquinaria, así como del eje y de las condiciones en las que se van a realizar los ensayos.
- Comprobar las conexiones de la cadena de medida. Comprobar además que los cables no están en movimiento, y que no existe contacto entre ellos y posibles fuentes de ruido.
- Poner a funcionar la máquina en las condiciones de velocidad previstas para los ensayos.
- Para cada una de estas condiciones, fijar los parámetros definidos para la adquisición de señales y realizar la adquisición.

Los parámetros definidos para la adquisición de señales se definen en el software Btool, como se muestra en la Figura 3.11 y son:

- La frecuencia de muestreo, de 6KHz porque a partir de 3KHz se sabe (por el criterio de Nyquist) que no aparecen frecuencias en el sistema analizado.

- La longitud de la señal, de 16384 puntos por ser una potencia de 2 (2^{14}) y porque así se evita el fenómeno del “zero padding” [24].
- El número de ciclos a medir y el tiempo de espera entre ciclos, respectivamente, 100 ciclos y 1 segundo.

Con estos parámetros aseguramos una gran cantidad de información y una adquisición de datos fiable. Teniendo en cuenta que con una frecuencia de muestreo de 6 KHz y una longitud de 16384 puntos, se obtiene el tiempo de adquisición por medida de 2,73 segundos, en el peor de los casos, con 20 Hz, se miden 54 ciclos enteros, sin olvidar que cada medida se repite 100 veces [3].



Figura 3.11: Parámetros definidos en la herramienta Btool para la adquisición de datos.

Se puede encontrar toda la información del protocolo de medidas en el Anexo B.

3.5. Base de datos generada

La adquisición de datos del espécimen ensayado genera una extensa base de datos. Dicha base agrupa información tanto del eje sano como de nueve niveles de defecto para las distintas velocidades estudiadas (20, 40 y 60 Hz). Aunque por motivos técnicos no se pudieron recopilar algunas medidas del eje sano y del eje con el primer y con el noveno nivel de defecto, se han obtenido unas 10000 medidas completas e independientes para cada velocidad, suficientes como para continuar el estudio.

La base de datos se ha organizado en distintas carpetas dependiendo del nivel de defecto y velocidad ensayados. En cada carpeta se registran 100 archivos con la extensión “.dat” que contienen los datos correspondientes a las 16384 (2^{14}) muestras de aceleraciones recogidas por el transductor. Se puede observar un esquema de esta organización en la Figura 3.12.

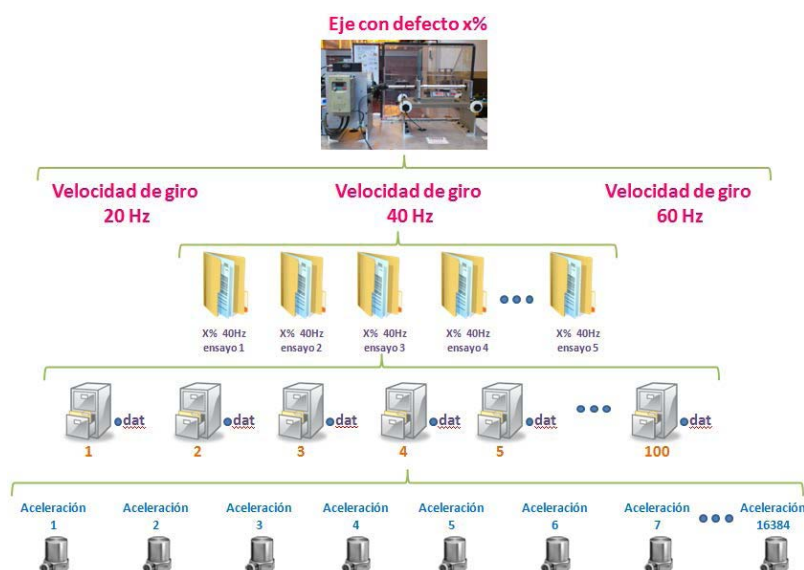


Figura 3.12: Almacenamiento de datos en los ensayos [27].

Las señales vibratorias temporales obtenidas por el transductor, como la que aparece en la Figura 3.13, son procesadas para calcular los paquetes de energía. Por cada carpeta de 100 archivos “.dat” se consiguen 512 paquetes de energía (ver Figura 3.14).

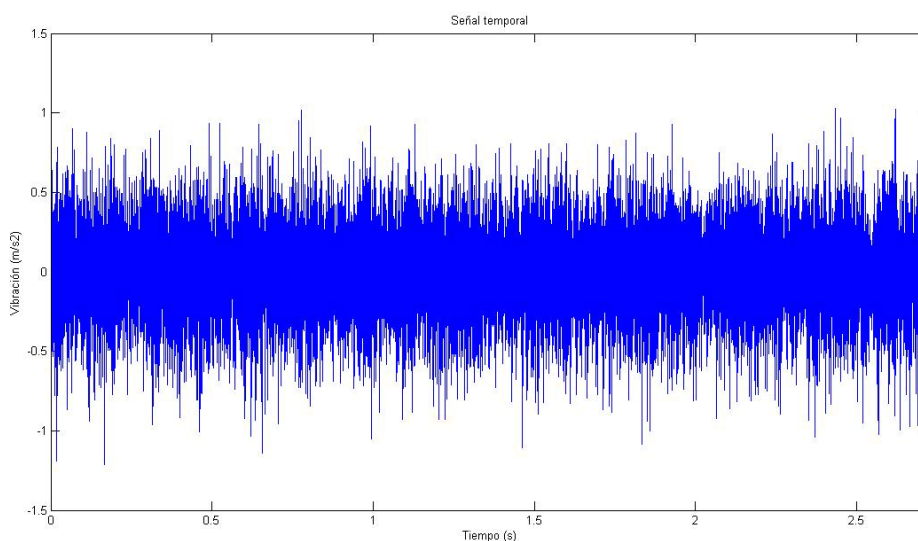


Figura 3.13: Señal temporal obtenida del sistema experimental para eje con nivel 2 de defecto.

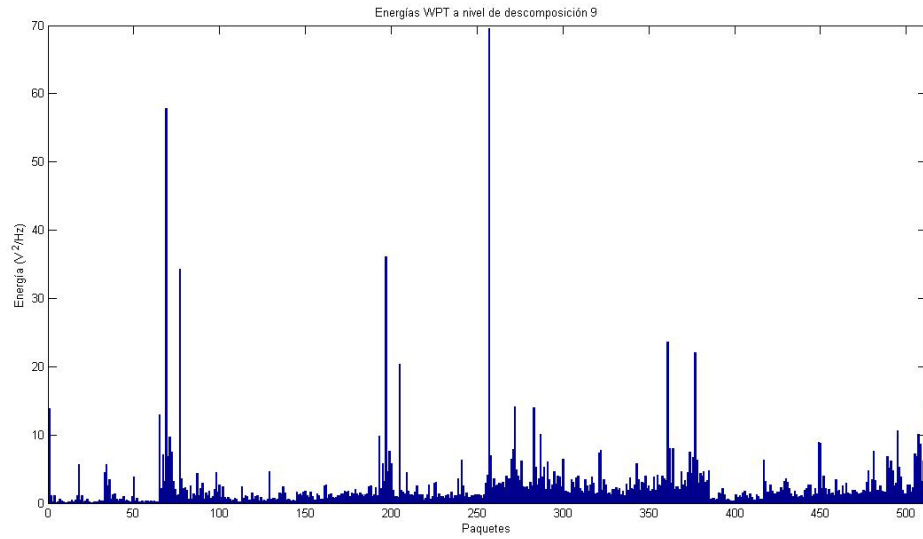


Figura 3.14: Paquetes de energía a nivel de descomposición 9 para eje con nivel 7 de defecto.



Capítulo 4

Obtención y análisis de resultados experimentales

Este capítulo cubre el objetivo principal del proyecto: obtener un patrón de comportamiento que sirva de referencia para discernir la existencia de fisuras en ejes ferroviarios y que pueda utilizarse para implementar un tipo de mantenimiento predictivo basado en el análisis de señales de vibración.

El capítulo está dividido en dos partes. La primera parte está dedicada a explicar el procedimiento desarrollado para obtener los resultados, describiendo los parámetros y herramientas necesarios para realizarlo y partiendo de las señales temporales adquiridas mediante el sistema experimental descrito en el capítulo anterior. La segunda parte presenta y analiza los resultados experimentales obtenidos, organizados en tres bloques que se corresponden con las velocidades de giro estudiadas. Esta parte finaliza con un apartado de consideraciones finales que resume los aspectos más destacables del análisis de resultados.

4.1. Parámetros necesarios y proceso de transformación

Las señales se procesarán utilizando la Transformada en Paquetes Wavelet. Posteriormente, se calculará la energía obtenida de esta transformación. En este proceso de cálculo de la energía se ha utilizado la función “wpdec” del programa Matlab®. Dicha función necesita ciertos parámetros, como el nivel de descomposición. Concretamente, en este Proyecto se ha seleccionado un nivel de descomposición 9 y una Wavelet madre Daubechies 6, como la que aparece en la Figura 4.1, debido a los buenos resultados obtenidos en estudios anteriores.

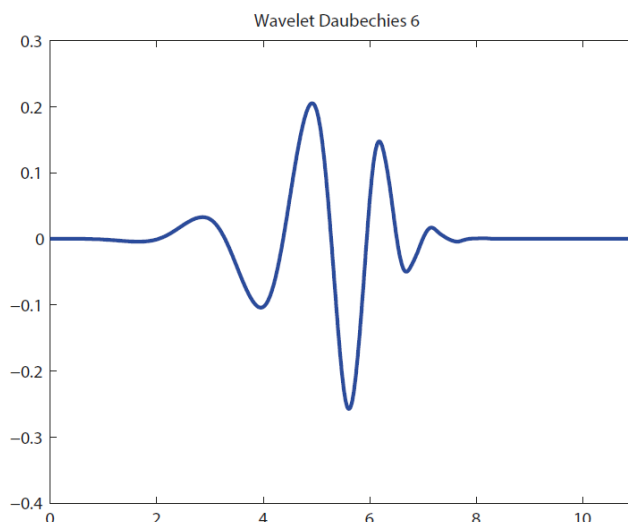


Figura 4.1: Wavelet madre Daubechies 6.

Para cada carpeta de 100 archivos “.dat”, se obtiene, al finalizar la descomposición, una matriz de datos de $512(2^9) \times 100$. Las 512 filas representan los 512 paquetes de energía en los que se ha dividido la señal de vibración, y las 100 columnas representan los valores correspondientes a cada paquete de energía, de cada uno de los 100 archivos que contiene cada carpeta. Debido a la dificultad de manejar tantos datos y para eliminar posibles aspectos no periódicos y ruidos que pudieran estar presentes por vibraciones externas a la máquina, al no encontrarse totalmente aislada, se realiza un promedio de las 100 columnas, obteniendo finalmente, 512 paquetes de energía por cada carpeta.

4.2. Selección de paquetes de energía

Posteriormente, se procede a la selección de los paquetes de mayor relevancia para la diagnosis de defecto planteada en este Proyecto, dado que no todos los paquetes o intervalos de frecuencia son igual de importantes. Como muestran estudios previos del departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid, dependiendo de la frecuencia a la que gire el eje y a la que se mida, hay intervalos de frecuencia que son más críticos para el estudio que otros.

Previamente, en el TFG de Francisco Carrillo [3] se analizó la componente 3x de la velocidad de rotación. Como se demostró en [28], los armónicos de la velocidad de giro son buenos indicadores de defecto.

Este Proyecto pretende ampliar y comparar resultados con dicho Trabajo. Se han seleccionado los paquetes relacionados con las componentes 1x, 2x, 4x y 5x de la velocidad de giro, para cada frecuencia (20, 40 y 60 Hz). Además, se han tenido también en cuenta los paquetes vecinos a dichas componentes de la velocidad de giro, porque

suelen presentar niveles de energía relevantes. A continuación, en la Tabla 4.1, se muestran los paquetes seleccionados para la diagnosis de defectos.

Paquetes		Frecuencias		
		20 Hz	40 Hz	60Hz
Armónicos	1x	3	6	16
		4 (v)	5 (v)	14 (v)
	2x	6	12	31
		5 (v)	10 (v)	27 (v)
	4x	12	23	61
		10 (v)	24 (v)	62 (v)
	5x	26	52	43
		25 (v)	50 (v)	44 (v)

Tabla 4.1: Paquetes de energía seleccionados para cada frecuencia y armónico. La (v) indica que se trata de un paquete vecino.

4.3. Tratamiento de los paquetes seleccionados

Una vez seleccionados los paquetes, se recopilan sus valores de energía en una hoja de Excel. Existen muchos datos, por lo que se debe ser meticuloso a la hora de organizarlo, teniendo en cuenta tanto el armónico como la frecuencia y el nivel de defecto.

Después, los valores de energía reciben un tratamiento estadístico, que consiste en el promediado de los datos correspondientes a cada nivel de defecto, frecuencia y armónico, así como en el cálculo de la desviación típica de dichos datos.

Luego, se debe estimar un valor umbral de energía que permita establecer un límite entre niveles de energía propios de eje sano y niveles de energía propios de eje con defecto. De manera que al traspasar este valor umbral nos encontremos en una zona, denominada de detección, en la que se detecte que el eje tiene defectos. Por el contrario, al no traspasar dicho valor, se considera que el eje está sano. El problema es que se trata de un parámetro bastante difícil de fijar en la mayoría de los casos, debido a que los primeros niveles de defecto presentan valores de energía muy próximos a los de eje sano.

Finalmente, se procede al cálculo de las curvas POD para comprobar la eficacia de detección de defectos a partir del análisis de la energía de una señal de vibración, al igual que se realiza en la prueba de ultrasonidos, como se comentó en el apartado 2.2.3.1. Se pretende con esto buscar un patrón de referencia para la diagnosis de defectos en cualquier eje que presente una fisura en el cambio de sección.

4.3.1. Cálculo de las curvas POD

Para la obtención de las curvas POD se parte del método de Señal de Respuesta, que se basa en el establecimiento de un valor umbral para un parámetro elegido, en este caso, la energía. Las curvas POD se generan mediante el cálculo de probabilidades de que el parámetro (la energía) supere o no el valor umbral.

Además, este método de Señal de Respuesta considera que cuando el tamaño del defecto aumenta, el valor de la señal de respuesta de la inspección se incrementa exponencialmente [2]. Aplicado a nuestro caso, esto significa que la distribución de energías de los paquetes seleccionados es log-normal, o lo que es lo mismo, para cada condición medida, la distribución de logaritmos de las energías es una normal según la media de los logaritmos y la desviación estándar de todos ellos.

Sin embargo, en este Proyecto se pueden simplificar los cálculos si se tiene en cuenta el teorema central del límite [25], que ha sido comprobado en trabajos previos [2]. Este teorema afirma que si se toman n grupos de muestras por cada condición, la distribución de medias muestrales de estas variables independientes tiende hacia una distribución normal, aunque las muestras procedan de una distribución no normal. Dado que se tienen n medias muestrales, cada una de ellas calculada por grupos de 100 valores de energía para un nivel de defecto α y para una condición de velocidad, se puede aplicar este teorema, así que no es necesario hallar los logaritmos.

Por tanto, se puede calcular la POD mediante la Ecuación 4.1, donde α representa el tamaño de defecto, F es la función de distribución acumulativa de la normal, $\hat{\alpha}_u$ el valor umbral elegido, $\bar{\mu}_n(\alpha)$ el valor promedio global de los promedios de la energía calculados por grupos de 100 y $\sigma_{\bar{\mu}_n(\alpha)}$ la desviación estándar de estos promedios.

$$POD(\alpha) = 1 - F(z) = 1 - F\left(\frac{\hat{\alpha}_u - \bar{\mu}_n(\alpha)}{\sigma_{\bar{\mu}_n(\alpha)}}\right) \quad (4.1)$$

En vista de la ecuación 4.3.1 se puede concluir que el valor umbral es imprescindible para obtener las curvas POD y decisivo para conseguir aproximarse a una curva POD ideal (Figura 2.3).

Los pasos que se han llevado a cabo para la obtención de resultados aparecen resumidos en el siguiente diagrama (Figura 4.2).

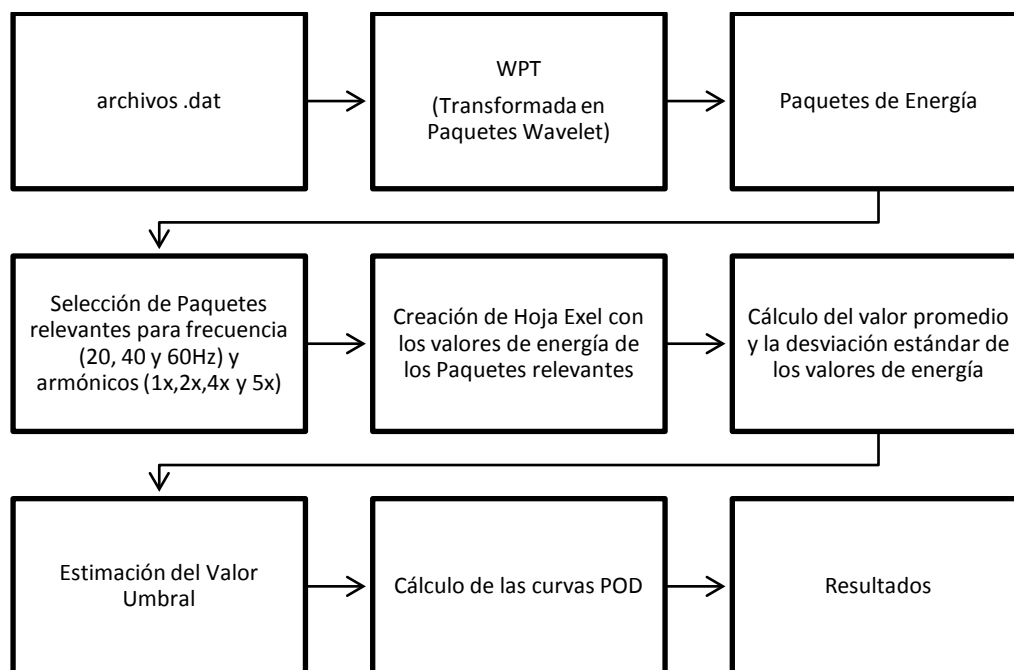


Figura 4.2: Diagrama de flujo del trabajo realizado para la obtención de resultados.

4.4. Resultados

Los resultados se presentan en tres apartados, uno para cada frecuencia. Dentro de cada apartado aparecen las imágenes más representativas del análisis realizado. La totalidad de las imágenes podrá consultarse en el Anexo C.

Tras analizar los paquetes de energía relevantes para los armónicos 1x, 2x, 4x y 5x a las velocidades de giro correspondientes a 20, 40 y 60 Hz se han observado los siguientes comportamientos.

4.4.1. Resultados para 20 Hz

En primer lugar, para la frecuencia de rotación de 20 Hz se contempla en todos sus armónicos una gran similitud entre la energía del eje sano y con distintos niveles de defecto, siendo difícil separarlos. Por tanto, es complicado definir un valor umbral que delimite correctamente la zona de detección. En las siguientes gráficas se muestran los resultados de la evolución de la energía, representada mediante su media y desviación estándar, para cada nivel de defecto.

Comencemos analizando el primer armónico (1x). En la Figura 4.3 se muestran los resultados obtenidos a 20 Hz para el primer armónico.

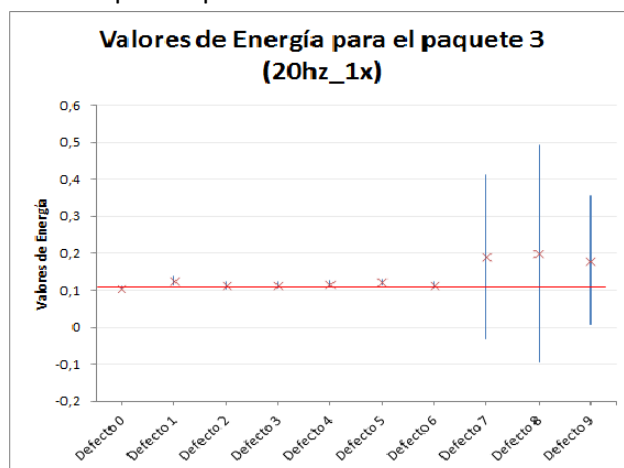


Figura 4.3: Valor medio y desviación (en azul) de energía, junto con valor umbral (en rojo), para el paquete 3, correspondiente con la frecuencia del primer armónico de la velocidad de giro de 20 Hz.

Los resultados obtenidos para el paquete que contiene la frecuencia contigua a 20Hz, es decir, el paquete vecino al del primer armónico de 20 Hz, aparecen en la Figura 4.4 y presentan unos valores de energía algo superiores a los de la Figura 4.3. Se deduce, por tanto, que el paquete vecino de 20 Hz resulta más significativo para nuestro estudio. Sin embargo, posee una desviación típica mayor a la del paquete de 20 Hz, lo que se traduce como una mayor incertidumbre de los valores obtenidos.

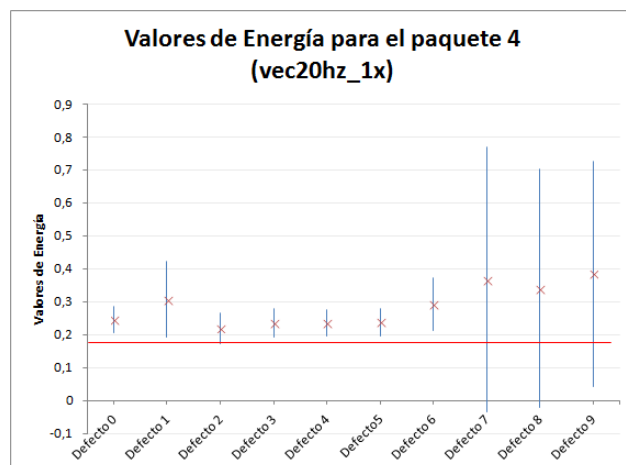


Figura 4.4: Valor medio y desviación (en azul) de energía, junto con valor umbral (en rojo), para el paquete 4, correspondiente con el paquete vecino del primer armónico de la velocidad de giro de 20 Hz.

En ambas figuras se ve reflejado un aumento significativo de la desviación típica a partir del nivel 7 de defecto, lo que induce a pensar que algún efecto negativo como el ruido está interfiriendo con la señal medida. A partir de estos datos se calculan las curvas POD. Los resultados para el primer armónico y su vecino pueden verse en la Figura 4.5. Como cabía esperar en vista de Figura 4.3 y Figura 4.4, las curvas POD que se obtienen distan mucho de ser ideales. Para el primer armónico a 20 Hz, se contempla un porcentaje de falsas alarmas alto y unas tasas de detección no especialmente altas. El paquete vecino de 20Hz resulta aún peor, con un porcentaje de falsas alarmas excesivamente alto y unas tasas de detección ligeramente mejores. Se puede concluir que ninguno de estos casos es óptimo para establecer un patrón de referencia.

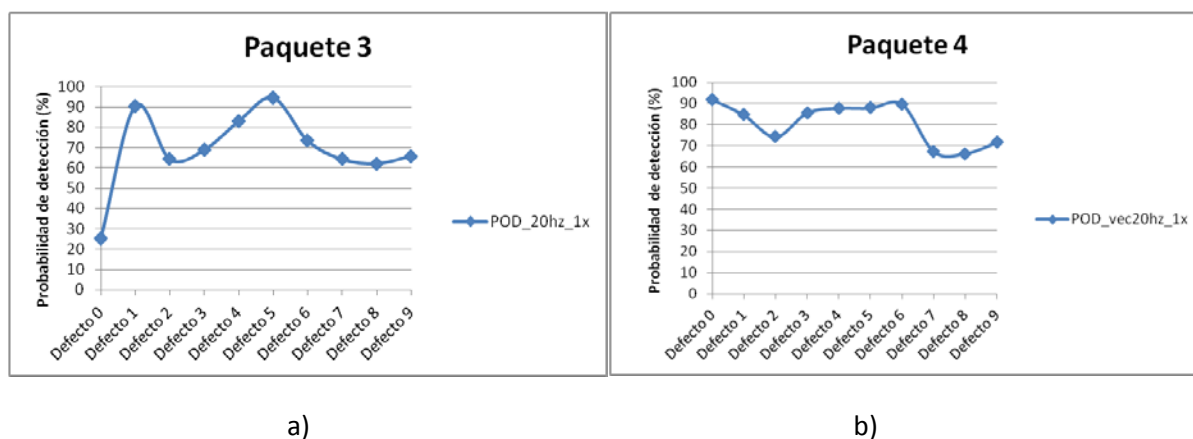


Figura 4.5: a) curva POD del primer armónico a 20 Hz. b) curva POD del vecino primer armónico a 20Hz.

Pasamos ahora a comentar los resultados del segundo armónico (2x). A diferencia del primer armónico, en este caso, los valores de energía entre el paquete que contiene la frecuencia del armónico y su vecino son muy próximos. Se muestra como ejemplo la gráfica de evolución de la energía del paquete vecino en la Figura 4.6.

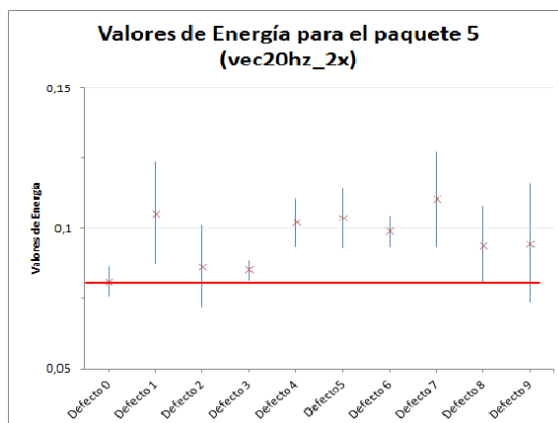


Figura 4.6: Valor medio y desviación (en azul) de energía, junto con valor umbral (en rojo), para el paquete 5, correspondiente con el paquete vecino del segundo armónico de la velocidad de giro de 20 Hz.

Los valores de energía de eje sano son cercanos a los de eje con defecto, lo que dificulta realizar una buena diagnosis del estado del eje. Este resultado aparece también reflejado en la curva POD que se obtiene. La Figura 4.7 refleja un porcentaje muy alto de falsas alarmas para el paquete vecino del segundo armónico de 20Hz. Además, presenta unas buenas tasas de detección desde el nivel 3 de defecto al nivel 7, donde comienzan a decaer. Por tanto, se puede descartar como patrón de referencia.

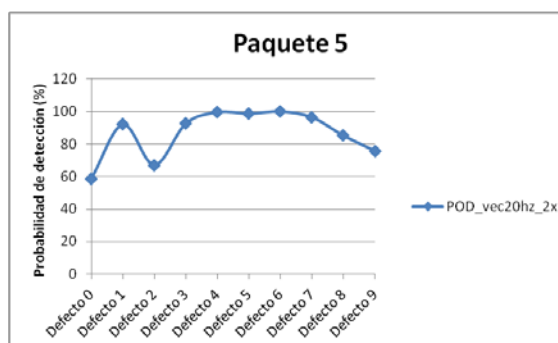


Figura 4.7: curva POD del vecino segundo armónico a 20Hz.

De forma análoga al segundo armónico, el cuarto armónico (4x) tiene valores de energía similares entre su paquete y el paquete vecino. Sin embargo, se aprecia una diferencia ligeramente mayor entre la energía de eje sano y eje con defecto que en los dos casos analizados anteriormente. En la Figura 4.8 se ve perfectamente este comportamiento.

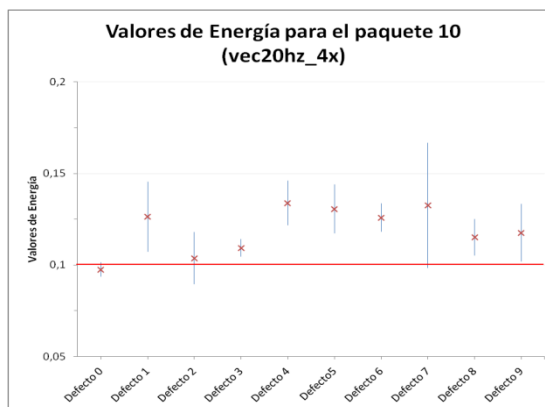


Figura 4.8: Valor medio y desviación (en azul) de energía, junto con valor umbral (en rojo), para el paquete 10, correspondiente con el paquete vecino del cuarto armónico de la velocidad de giro de 20 Hz.

La curva POD que se obtiene a partir de los datos de la Figura 4.8 muestra un porcentaje de falsas alarmas de un 25% y unas tasas de detección superiores al 80 %, salvo para el nivel 2 de defecto (ver Figura 4.9), lo que representa una mejora en la diagnosis del estado del eje. Pero hay que tener en cuenta que la diferencia de energía entre eje sano y con defecto sigue siendo pequeña (del orden de las centésimas).

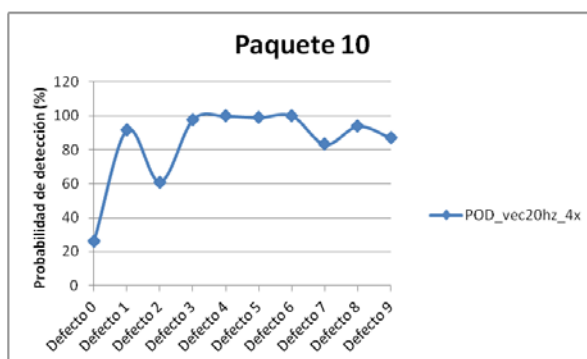


Figura 4.9: curva POD del vecino cuarto armónico a 20Hz.

Del quinto armónico (5x) hay que comentar que presenta un comportamiento similar al del cuarto armónico, aunque mejorando un poco los resultados. Es decir, tiene niveles de energía similares entre el paquete que contiene el armónico y su paquete vecino y resulta más fácil, que para los dos primeros armónicos, diferenciar entre eje sano y con defecto. Esto no significa que la diferencia sea grande, dato a tener presente a la hora de analizar la curva POD correspondiente, ya que presenta resultados prometedores con un porcentaje de falsas alarmas cercano al 0% y unas tasas de detección superiores al 80% (salvo para el nivel 2 de defecto). En la Figura 4.10 se ve, como ejemplo, la gráfica de evolución de la energía y la curva POD para el paquete vecino al quinto armónico, las gráficas para el quinto armónico son similares.

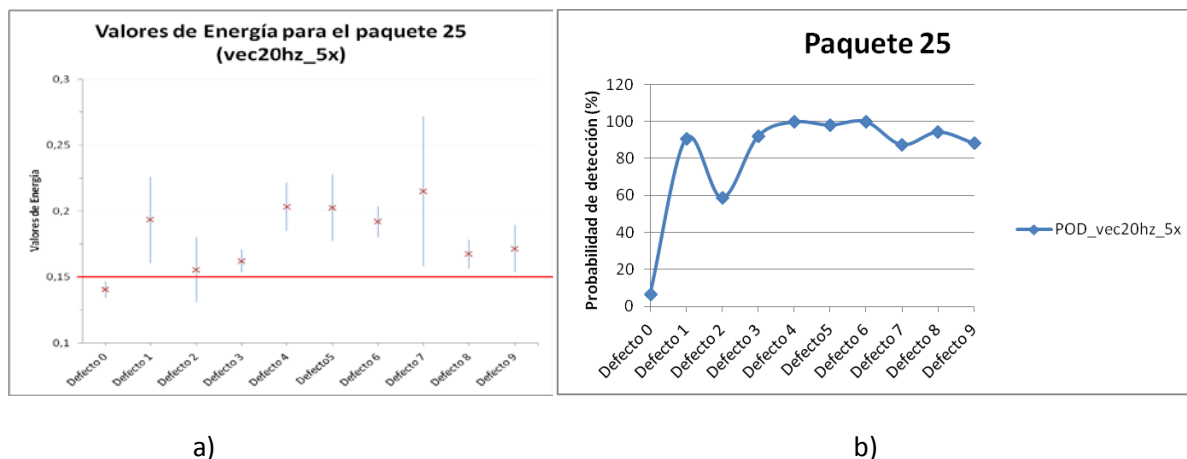


Figura 4.10: a) Valor medio y desviación (en azul) de energía, junto con valor umbral (en rojo), para el paquete 25, correspondiente con el paquete vecino del quinto armónico de la velocidad de giro de 20 Hz. b) curva POD del paquete 25.

Finalmente, al comparar estos resultados con los obtenidos en [3] para el tercer armónico (3x) se contempla un mismo comportamiento con porcentaje de falsas alarmas alto y tasas de detección no tan altas.

Se puede concluir que la velocidad de giro correspondiente a 20 Hz en ningún caso es recomendable para establecer un patrón de referencia dado que no existiría una diagnosis fiable.

4.4.2. Resultados para 40 Hz

En segundo lugar, para la frecuencia de rotación de 40 Hz se observan 3 tipos de comportamientos distintos. El primer comportamiento, similar a lo visto anteriormente para 20 Hz, aparece en los dos primeros armónicos, es decir, 1x y 2x. Concretamente, en la Figura 4.11 se muestran las gráficas que mejor ilustran dicho comportamiento.

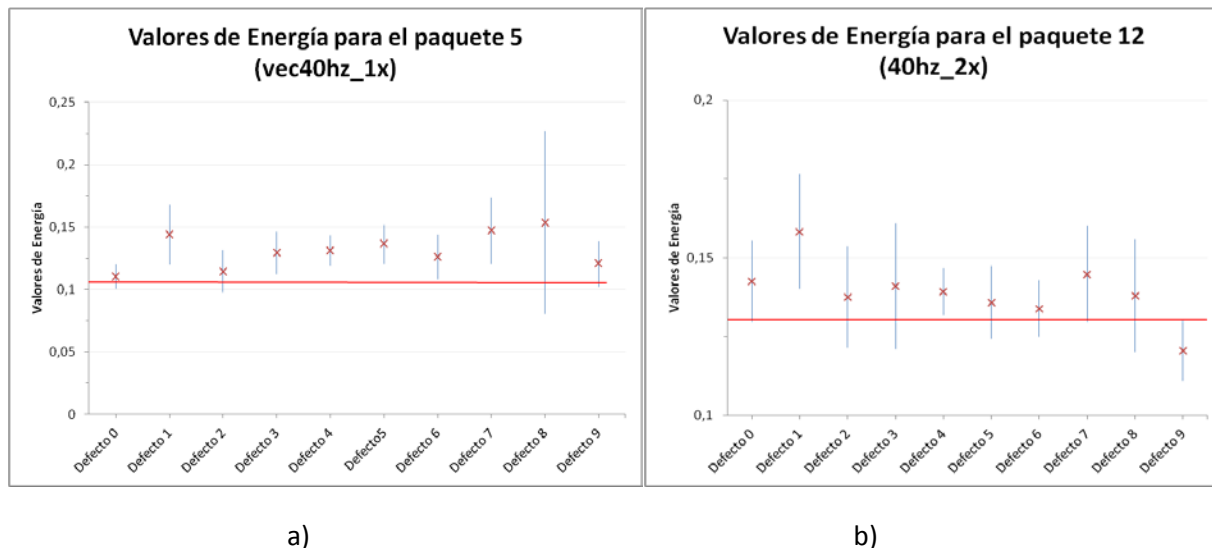


Figura 4.11: a) Valor medio y desviación (en azul) de energía, junto con valor umbral (en rojo), para el paquete 5, correspondiente con el paquete vecino del primer armónico de la velocidad de giro de 40 Hz. b) Valor medio y desviación (en azul) de energía, junto con valor umbral (en rojo), para el paquete 12, correspondiente con la frecuencia del segundo armónico de la velocidad de giro de 40 Hz.

Como se observa en la Figura 4.11, existe una gran similitud entre los valores de energía del paquete vecino al primer armónico y los del paquete del segundo armónico, sin embargo, para el nivel 8 de defecto aparece una mayor desviación típica en el primer armónico, por tanto, los valores correspondientes al segundo armónico serían más fiables. Al mismo tiempo se observa que, como ocurría para 20 Hz, los valores de energía de eje sano siguen siendo muy próximos a los de eje con defectos, presentan diferencias del orden de las centésimas, por lo que resulta difícil establecer un valor umbral que los separe y obtener unas curvas POD aceptables (ver Figura 4.12). Los porcentajes por falsas alarmas son muy altos y las tasas de detección son bastante bajas para los dos últimos niveles de defecto, donde cabría esperar los máximos valores, así que no se podría definir claramente un área de detección y no serviría para realizar una diagnosis fiable.

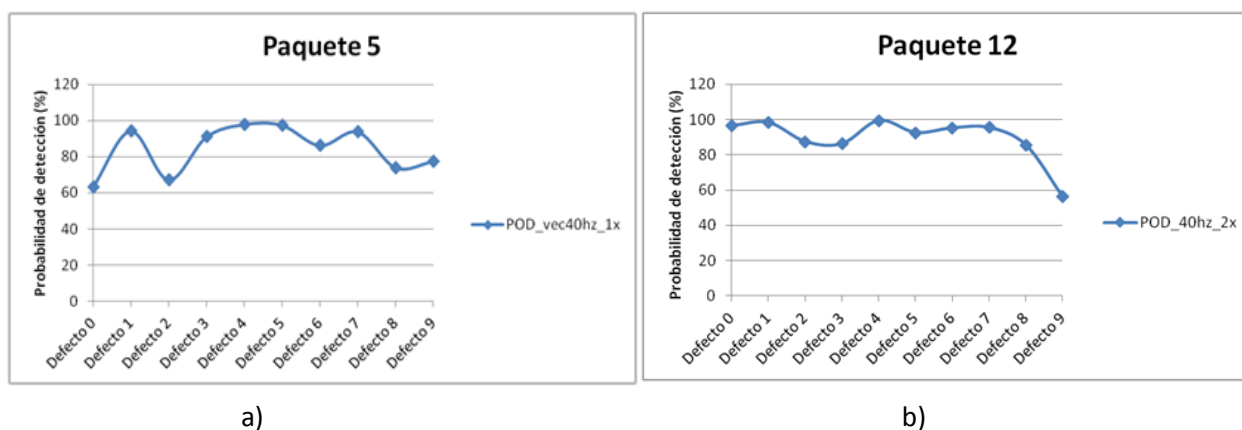


Figura 4.12: a) curva POD del vecino del primer armónico a 40Hz. b) curva POD del segundo armónico a 40Hz.

El segundo comportamiento que encontramos para la frecuencia de rotación de 40 Hz, presenta forma de “V” con un valor de energía mínimo para el nivel de defecto 5. Resulta llamativo porque se esperaba que la energía aumentara al aumentar el nivel de defecto. Este comportamiento aparece para el paquete que contiene el cuarto armónico, su paquete vecino y para el paquete vecino del quinto armónico. Comparemos en primer lugar los paquetes del cuarto armónico, que se muestran en Figura 4.13.

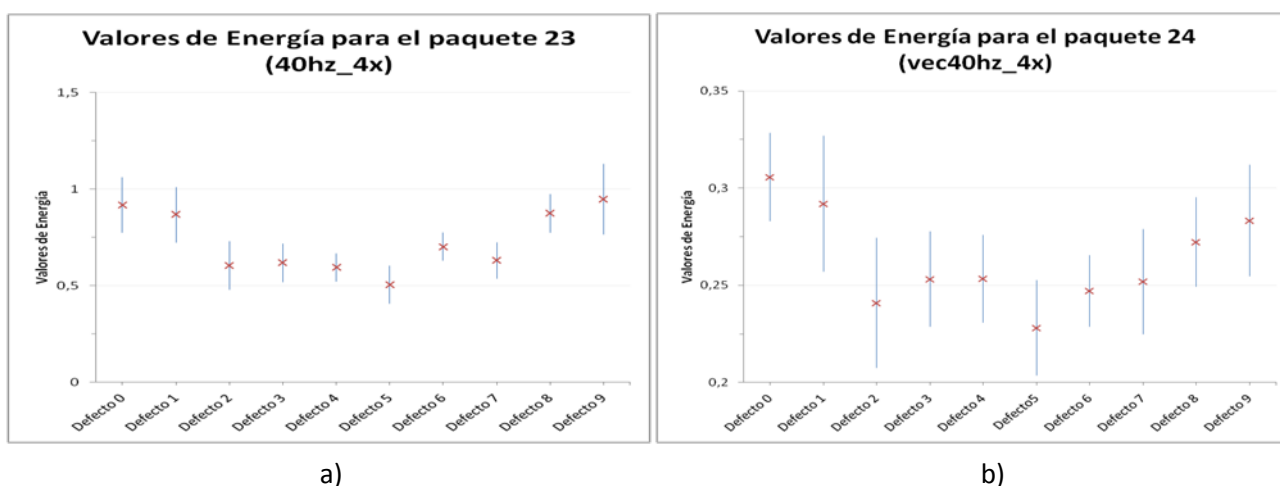


Figura 4.14: a) Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 23, correspondiente con la frecuencia del cuarto armónico de la velocidad de giro de 40 Hz. b) Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 24, correspondiente con el paquete vecino del cuarto armónico de la velocidad de giro de 40 Hz .

Como se aprecia en la Figura 4.13, los valores de energía del paquete que contiene la frecuencia del cuarto armónico son superiores a los valores de energía de su paquete vecino. Aunque ambas gráficas presentan una tendencia descendente hasta el nivel 5 de defecto y ascendente a partir de él. Si comparamos ahora estas gráficas con la obtenida para el paquete vecino del quinto armónico (ver Figura 4.14) podemos observar como los valores de energía de éste son menores que los obtenidos para el cuarto armónico y su vecino, pero se mantiene la tendencia descendente hasta el nivel 5 de defecto y ascendente a partir de él. En cualquier caso, los valores de energía que se observan en este segundo comportamiento son mayores a los vistos hasta el momento, como era de esperar al ir aumentando la velocidad de rotación.

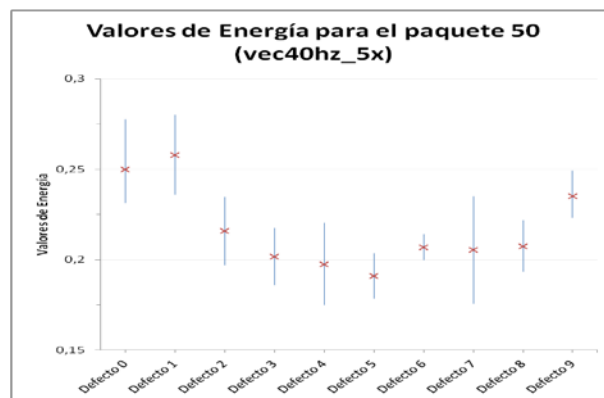


Figura 4.15: Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 50, correspondiente con el paquete vecino del quinto armónico de la velocidad de giro de 40 Hz.

En este caso resulta absurdo intentar calcular las curvas POD como la probabilidad de detectar por encima de un valor umbral, porque la mayoría de defectos tienen una energía por debajo de la de eje sano. Sin embargo, se podría definir la zona de detección por debajo de un valor umbral supuesto. De acuerdo a este planteamiento tendríamos una curva POD definida al revés. El problema sería que tendría que elegirse entre tener un porcentaje de falsas alarmas bajo con tasas de detección bajas también o tasas de detección altas con falsas alarmas altas, ya que los niveles de energía de los últimos niveles de defecto son muy próximos a los de eje sano. Se entiende mejor esta idea observando la Figura 4.15.

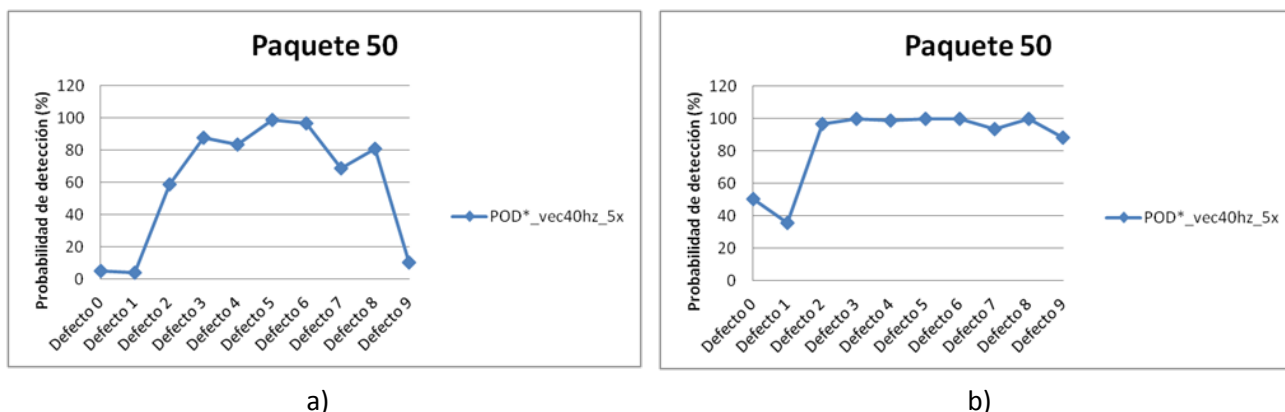


Figura 4.16: Probabilidad de detección por debajo del valor umbral para el paquete vecino del quinto armónico de la velocidad de giro de 40 Hz. a) optimizando falsas alarmas. b) optimizando tasas de detección.

Una posible solución sería obviar los niveles de defecto superiores al 5, pero no merece la pena dado que tampoco se conseguirían unos resultados muy fiables. Resultaría interesante buscar una manera alternativa de evaluar si este patrón de comportamiento en forma de “V” podría ser adecuado para una diagnosis fiable del estado del eje, centrándose especialmente en el análisis del nivel de defecto 5. Además, sería muy conveniente realizar nuevos ensayos que validen este comportamiento en “V”.

Por tanto, se abre aquí una nueva línea de investigación pero no una solución inmediata que proporcione un patrón de referencia.

El tercer comportamiento surge en el paquete 52, correspondiente con la frecuencia del quinto armónico de la velocidad de giro de 40 Hz, la energía descende a medida que aumenta el nivel de defecto, como puede verse en la Figura 4.16, y continúa resultando llamativo. Los valores de energía son comparables a los de su paquete vecino (Figura 4.14) pero su comportamiento es distinto, porque la energía de los últimos niveles de defecto no se aproxima a la de eje sano. Aprovechando el descenso de energía al aumentar el defecto, en este paquete se podría establecer una probabilidad de detección por debajo del valor umbral, como se había propuesto antes. Se obtendría una curva POD definida al revés, pero que seguiría siendo un buen indicador de la fiabilidad de la diagnosis. En la Figura 4.17 se muestra la curva POD definida para una zona de detección por debajo del valor umbral.

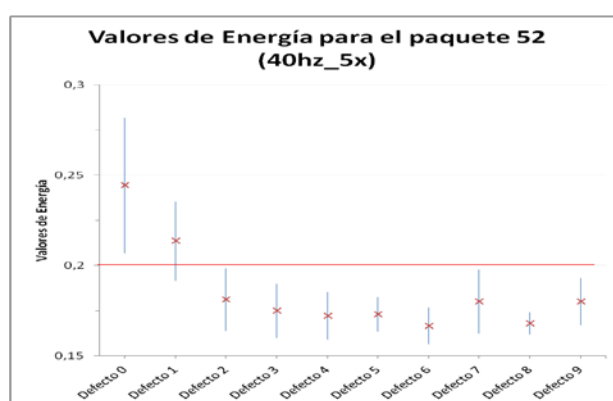


Figura 4.17: Valor medio y desviación (en azul) de energía, junto con valor umbral (en rojo) para el paquete 52, correspondiente con la frecuencia del quinto armónico de la velocidad de giro de 40 Hz.

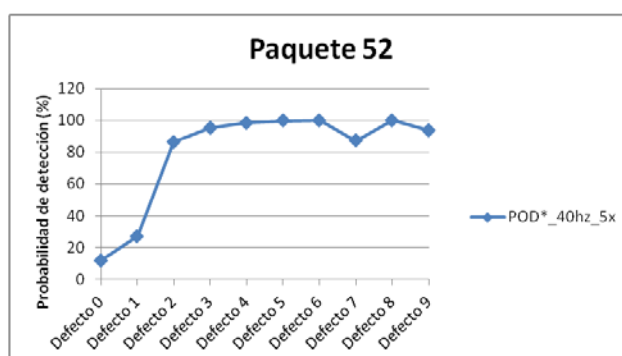


Figura 4.18: Probabilidad de detección por debajo del valor umbral para el paquete 52, correspondiente con la frecuencia del quinto armónico de la velocidad de giro de 40 Hz.

En la gráfica anterior se contempla un porcentaje de falsas alarmas alrededor del 10% y unas tasas de detección superiores al 85% a partir del nivel de defecto 2. Si juntamos este hecho, al de que este paquete presenta una diferencia, que empieza a ser significativa, entre los valores de energía de eje sano y eje con defectos, este último comportamiento podría emplearse como patrón.

Para el tercer armónico [3] apareció un comportamiento similar al último descrito en este apartado, se definió también una zona de detección por debajo del valor umbral y se calcularon las curvas POD correspondientes. Se obtuvieron, sin embargo, porcentajes de falsas alarmas más altos y tasas de detección más bajas que para el paquete 52, por lo que se descartaron para la detección de defectos.

En suma, la frecuencia de rotación de 40 Hz presenta gran variedad de comportamientos, de los cuales, únicamente se podría aprovechar para detectar defectos el correspondiente al paquete que contiene la frecuencia del quinto armónico.

4.4.3. Resultados para 60 Hz

Finalmente, para la frecuencia de rotación de 60Hz destaca la forma en “V”, con un valor mínimo de energía en el nivel de defecto 5, que ya habíamos visto para la frecuencia de rotación de 40hz, aunque se presenta para niveles de energía mayores y de manera más definida que en dicho caso. No deja de ser llamativo que la energía comienza a descender al aumentar el nivel de defecto, para luego ascender de nuevo a partir del defecto 5, porque se esperaba que la energía de eje sano fuera creciendo a medida que aumentara el nivel de defecto. También es importante remarcar que para 60 Hz encontramos los valores más altos de energía de todos los casos analizados. A continuación estudiamos las particularidades que aporta cada armónico.

Como representante del primer armónico se muestra en la Figura 4.18 la gráfica de la evolución de la energía del paquete que contiene la frecuencia del primer armónico de la velocidad de giro de 60Hz. En la gráfica se ve claramente un descenso de la energía hasta el nivel de defecto 5 y un aumento a partir del mismo. Los valores de energía son más altos que los que teníamos para el primer armónico de 20 y de 40Hz. Los valores de energía del eje sano son muy similares a los de eje con nivel de defecto 1, pero fácilmente diferenciables del resto de niveles de defecto, empezamos a hablar de diferencias del orden de magnitud de las décimas. Por tanto, estos resultados son más relevantes que sus homólogos de las frecuencias antes estudiadas. Sin embargo, la desviación típica es grande para varios niveles de defecto, especialmente para el nivel de defecto 9, con lo que incrementa la incertidumbre de estos valores de energía. Así que no podemos garantizar una diagnosis fiable seleccionando este paquete y no tiene sentido calcular la curva POD.

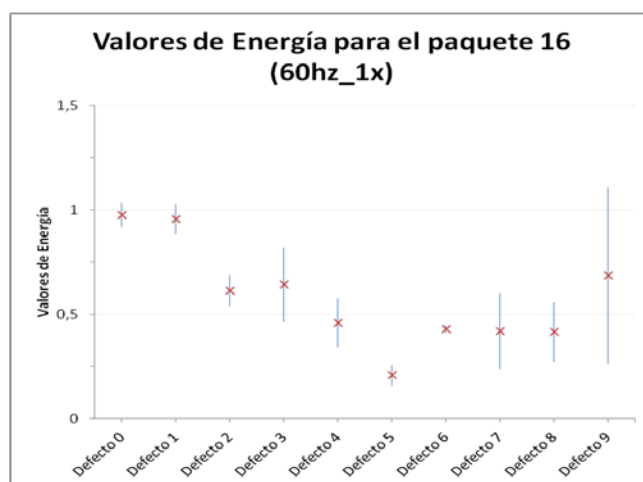


Figura 4.19: Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 16, correspondiente con la frecuencia del primer armónico de la velocidad de giro de 60 Hz.

Los resultados obtenidos para el segundo armónico de 60 Hz resultan peores que los del primero, se muestra como ejemplo la Figura 4.19 Aunque el nivel de defecto 5 sigue presentando un valor mínimo de energía, el nivel 6 de defecto resulta atípico con un pico de energía muy superior a los de los defectos siguientes. La separación entre eje sano y con defectos está menos definida. Todos los valores de energía son ligeramente menores a los observados para el primer armónico. Por el contrario, la desviación típica es alta en un número mayor de niveles de defecto, con lo que se obtiene una diagnosis menos fiable que en el caso anterior.

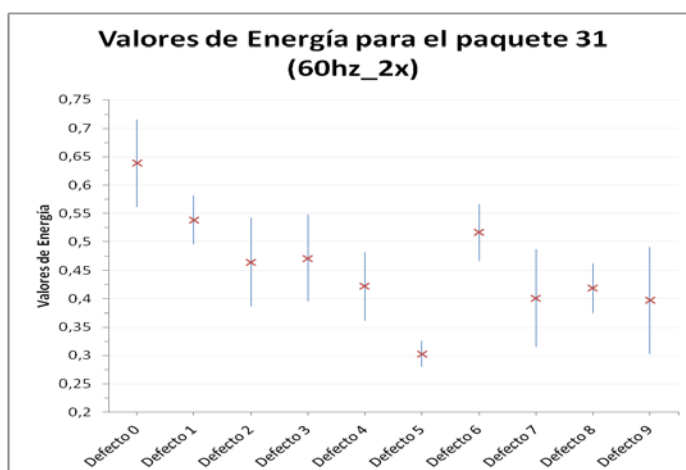


Figura 4.20: Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 31, correspondiente con la frecuencia del segundo armónico de la velocidad de giro de 60 Hz.

Los peores resultados para la frecuencia de rotación de 60 Hz los encontramos sin duda en su cuarto armónico. Los valores de energía se presentan de forma más desordenada y con grandes desviaciones típicas, por lo que queda totalmente descartado como posible patrón de referencia. Un ejemplo de este comportamiento puede verse en Figura 4.20.

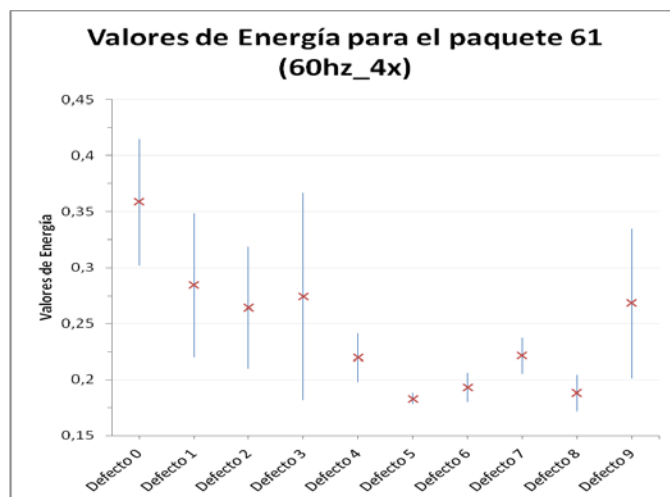


Figura 4.21: Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 61, correspondiente con la frecuencia del cuarto armónico de la velocidad de giro de 60 Hz.

El quinto armónico resulta el caso más favorecido tanto en esta frecuencia como en las anteriores. El mejor ejemplo se da en el paquete 44, correspondiente con el paquete vecino del quinto armónico de la velocidad de giro de 60Hz, donde una vez más el nivel de defecto 5 presenta un valor mínimo (Figura 4.21). Presenta los valores de energía más altos, se puede diferenciar bien entre eje sano y con defectos a partir del nivel 2 de defecto, por lo que se puede establecer un valor umbral para determinar una zona de detección. Aprovechando la tendencia descendente de energía y la subida suave de los últimos niveles de defecto, que no alcanzan valores de energía próximos a los de eje sano, se puede definir la zona de detección por debajo del valor umbral y calcular la curva POD en función de esto como ya se había mostrado para 40Hz. La curva POD que se obtiene aparece en la Figura 4.22.

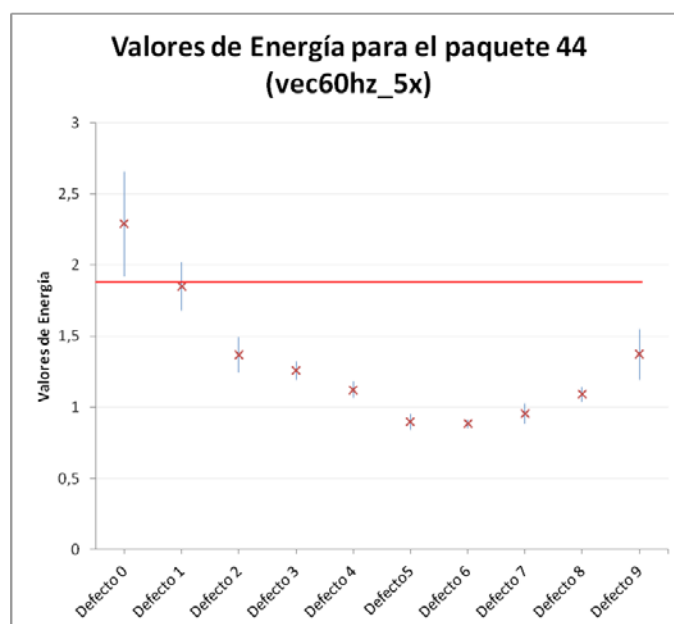


Figura 4.22: Valor medio y desviación (en azul) de energía, junto con valor umbral (en rojo) para el paquete 44, correspondiente con el paquete vecino del quinto armónico de la velocidad de giro de 60 Hz.

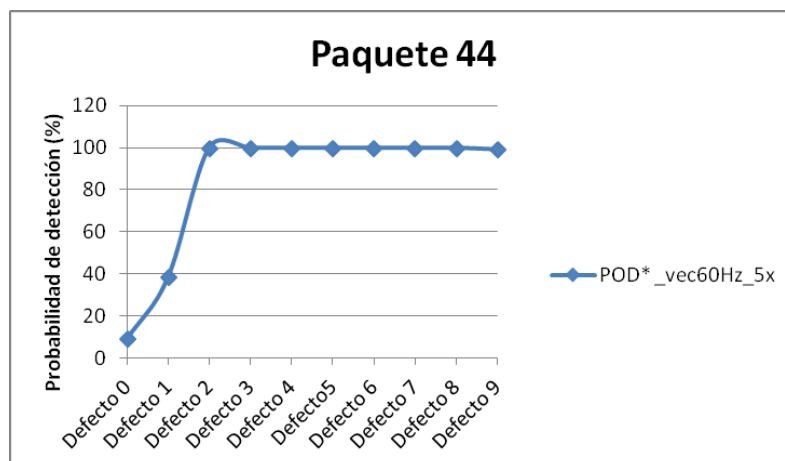


Figura 4.23: Probabilidad de detección por debajo del valor umbral para el paquete 44, correspondiente con el paquete vecino del quinto armónico de la velocidad de giro de 60 Hz.

La curva POD presenta un porcentaje de falsas alarmas menor del 10% y unas tasas de detección del 100% para todos los niveles de defecto salvo para el primero, que está cercano al 40%. Resulta una curva POD prácticamente ideal, así que este paquete resulta idóneo para emplearse como patrón de referencia en la diagnosis del estado de un eje.

Otro resultado a tener en cuenta es el obtenido en [3] sobre el estudio del tercer armónico. Se observa también un comportamiento descendente hasta el nivel de defecto 5 y ligeramente ascendente a partir de él (Figura 4.23) igual al del paquete 44, pero con valores de energía más altos. Los valores de energía de eje sano están alejados de los de eje con defectos por lo que se puede establecer una clara separación. Una vez más se ha definido una zona de detección por debajo del valor umbral, por ser lo más conveniente.

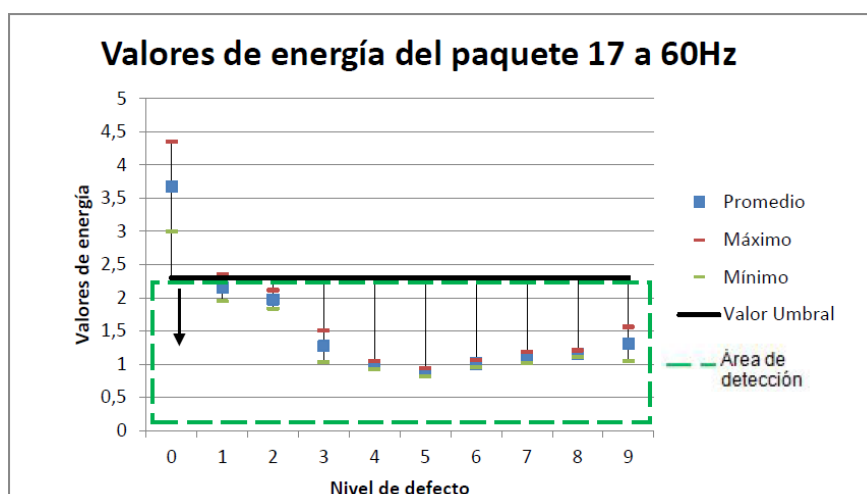


Figura 4.24: Valores de energía para el paquete 17 [3].

En resumen, por un lado, tanto el paquete 17 como el 44 son buenos indicadores del estado del eje, así que se pueden utilizar para generar un patrón. Por otro lado, parece que la forma en “V” es un comportamiento recurrente, así que es interesante estudiar la

energía del nivel de defecto 5 y la explicación del fenómeno que en él acontece. Una teoría posible sería que a partir de ese nivel de defecto cambia el comportamiento del eje, debido a una redistribución de esfuerzos, pero habría que comprobarlo.

4.4.4. Consideraciones finales

De los resultados analizados en el presente capítulo se desprenden las siguientes consideraciones.

En el análisis de la velocidad de giro de 20 Hz se ha observado valores de energía correspondiente a eje sano muy próximos a los valores de ejes con defecto, que dificultan la determinación de una zona de detección. Esto se ve reflejado en los altos porcentajes de falsas alarmas y no tan altas tasas de detección que aparecen en las curvas POD. La situación es especialmente desfavorable para el primer y el segundo armónico.

Además en el primer armónico aparece una gran desviación típica a partir del nivel 7 de defecto, que induce a pensar que algún efecto negativo como el ruido está interfiriendo con la señal medida.

Aunque para 4x y 5x se puede diferenciar con mayor claridad una separación entre eje sano y con defectos, los valores de energía continúan muy próximos entre ellos. La mayor separación entre valores de eje sano y con defectos produce una mejora en las curvas POD. A pesar de esta mejora, no se debe olvidar que las diferencias de energía entre eje sano y con defectos siguen siendo muy pequeñas (del orden de las centésimas) y por lo tanto insuficientes para establecer un patrón de referencia.

Por último, se ha comprobado que los altos porcentajes de falsas alarmas y no tan altas tasas de detección también ocurrían con el tercer armónico.

Entonces, se puede concluir que la velocidad de giro correspondiente a 20 Hz en ningún caso es recomendable para establecer un patrón de referencia, dado que no existiría una diagnosis fiable.

En el análisis de la velocidad de giro de 40Hz se han detectado 3 tipos de comportamiento distintos.

El primer tipo de comportamiento aparece para los dos primeros armónicos (1x y 2x). Es idéntico a lo visto para 20Hz, poca diferencia entre energía de eje sano y con defectos, incluso los valores de energía son parecidos a los vistos con 20Hz, tasas de detección no especialmente altas y falsas alarmas muy altas. Así que no aporta nada nuevo.

El segundo tipo de comportamiento era el que presentaba una forma de “V”, los valores de energía descendían hasta el nivel 5 de defecto y a continuación aumentaban

otra vez. Aparecen valores de energía superiores a los vistos anteriormente. Abre la necesidad de analizar con mayor profundidad lo que ocurre en el nivel 5 de defecto.

El tercer tipo se da para el paquete que contiene la frecuencia del quinto armónico. La energía disminuye a medida que aumenta el nivel de defecto. Se puede definir la zona de detección por debajo del valor umbral y a partir de ahí calcular las curvas POD. Se tienen unas tasas de detección muy altas y un porcentaje de falsas alarmas bajo. Además, existe una separación clara entre valores de energía de eje sano y de eje con defectos, por lo que resulta el paquete más prometedor para la detección de defectos. Los paquetes del tercer armónico también presentaban este tipo de comportamiento, pero con peores resultados.

Resumiendo, el único paquete que podría interesar como patrón de referencia es el correspondiente con el quinto armónico de la velocidad de giro de 40Hz.

Finalmente, en el análisis de la velocidad de giro de 60Hz destaca la forma en “V”, con un valor mínimo de energía en el nivel de defecto 5 y los valores de energía más altos de todas las frecuencias estudiadas. Para 60 Hz encontramos los resultados más relevantes de este proyecto.

El primer armónico presenta unos resultados mucho mejores que para las otras frecuencias, pero siguen sin ser lo suficientemente buenos como para realizar una diagnosis fiable del estado del eje.

Tanto el segundo como el cuarto armónico presentan resultados muy desfavorables que no se pueden tener en cuenta.

El paquete 44, correspondiente con el paquete vecino del quinto armónico de la velocidad de giro de 60 Hz, es el mejor resultado obtenido y da lugar a una curva POD casi ideal, es decir, con bajo porcentaje de falsas alarmas y altas tasas de detección. Este paquete junto con el 17, correspondiente con el tercer armónico, pueden emplearse para realizar una diagnosis fiable del estado de un eje ferroviario en su cambio de sección.

También hay que destacar el recurrente comportamiento en forma de “V”, con un mínimo en el nivel de defecto 5, que ya había aparecido en la frecuencia de 40Hz. Añadiendo una vez más, lo interesante que sería estudiar la energía del nivel de defecto 5 y la explicación del fenómeno que en él acontece.

Capítulo 5

Conclusiones y futuros desarrollos

5.1. Conclusiones

En este Proyecto Fin de Carrera se ha descrito el procedimiento desarrollado para conseguir un patrón que permita realizar un diagnóstico óptimo de la existencia de fisuras en un eje ferroviario, basándose en el análisis de señales vibratorias producidas durante el funcionamiento del eje.

Del trabajo llevado a cabo se pueden realizar un conjunto de consideraciones de especial relevancia que se detallan a continuación, relativas al sistema experimental, al tratamiento de las señales involucradas, y a los propios resultados obtenidos.

5.1.1. Consideraciones sobre el sistema experimental

- Se han fijado las siguientes condiciones de estudio para evitar la dispersión de los datos: eje ferroviario a escala 1/8 sano y con hasta 9 niveles diferentes de defectos transversales localizados en el cambio de sección.
- Para cada condición de estudio se han realizado medidas a tres niveles de velocidad distintos: 20, 40 y 60 Hz.
- Se ha empleado una cadena de medida que incluye el software Btool, encargado del registro de las señales.
- Para garantizar la calidad de la información se ha obtenido un elevado número de señales de vibración, a pesar de la dificultad que conlleva el tratamiento de un volumen alto de las mismas.

5.1.2. Consideraciones sobre el tratamiento de las señales

- Siguiendo la metodología usada en trabajos previos del grupo de investigación, se han calculado los valores de energía de las señales de vibración mediante la transformada en paquetes Wavelet, utilizando una Daubechies 6 como Wavelet madre y un nivel de descomposición de 9.

- Se han elegido los valores de energía correspondientes a las frecuencias más críticas, obtenidas en estudios anteriores, con el fin de buscar el patrón óptimo para la diagnosis de los defectos. Concretamente, se han analizado la frecuencia correspondiente a la velocidad de giro, $1x$, y sus armónicos $2x$, $4x$ y $5x$.
- Se han elaborado las curvas POD, para comprobar la eficacia de detección de defectos a partir del análisis de la energía de una señal de vibración, estimando previamente el correspondiente valor umbral para cada caso de estudio.

5.1.3. Consideraciones sobre los resultados

- A bajas velocidades de giro, 20 Hz, no se obtienen resultados adecuados para definir un patrón de referencia. Sin embargo, a altas velocidades encontramos resultados más prometedores.
- El paquete 44 a 60 Hz resulta el más indicado para convertirse en patrón de referencia, presentando un comportamiento similar al paquete 17 a 60 Hz de [3]. Así mismo, el paquete 52 a 40 Hz presenta un comportamiento bastante prometedor, por lo que podría convertirse también en patrón de referencia.
- Se observa la aparición de un comportamiento en forma de V, con un mínimo para el nivel de defecto 5, principalmente a 60 Hz. Dado que parece que este comportamiento es recurrente, podría utilizarse para definir un patrón.

5.2. Futuros desarrollos

El Proyecto Fin de Carrera realizado permite abrir paso a las siguientes líneas de investigación:

- Mejora del aislamiento de la máquina de ensayos para evitar ruidos y alteraciones, con los objetivos de aumentar la fiabilidad de los datos recopilados e intentar obtener mejores resultados a bajas velocidades de giro.
- Mejora del software Btool, empleado en la adquisición de medidas, para que muestre en tiempo real todas las señales de vibración que va recogiendo, en lugar de mostrar únicamente la última señal recopilada al terminar una medición, como hace actualmente. Esto permitiría detectar datos atípicos con mayor antelación, pudiendo repetir la medición en el mismo momento y evitando tener que descartar en la fase de tratamiento de señales grupos enteros de mediciones.

- Análisis detallado del nivel 5 de defecto para comprobar si la teoría de que a partir de ese nivel de defecto cambia el comportamiento del eje, debido a una redistribución de esfuerzos, es cierta.
- Repetición de los ensayos en nuevos ejes para comprobar si se siguen obteniendo los mismos resultados que en este trabajo.
- Realización de nuevos ensayos combinando fisura central y fisura en cambio de sección para observar el comportamiento de un eje con más de una fisura.
- Realización de nuevos ensayos sometiendo el eje a carga para poder estudiar la influencia de ésta.
- Realización de ensayos en eje ferroviario real para contrastar con los resultados obtenidos en laboratorio y buscar la viabilidad de implantar esta técnica de análisis de señales de vibración como una forma de mantenimiento de ejes.



Bibliografía

- [1] S.Cantini y S.Beretta. *Structural reliability assessment of railway axles*. Lucchini RS,2011.
- [2] M.J. Gómez. *Metodología de selección de indicadores óptimos para el análisis y diagnosis del estado de la máquina: aplicación a elementos mecánicos rotativos*. Tesis Doctoral, Universidad Carlos III, Madrid, 2014.
- [3] F. Carrillo Rodrigo. *Adquisición de datos y procesamiento para detección de defectos localizados en el cambio de sección de un eje a través de la WPT*. Trabajo Fin de Grado, Universidad Carlos III, Madrid, 2014.
- [4] F. J. González Fernández. *Teoría y práctica del Mantenimiento Industrial Avanzado*. FC Editorial, 3ª edición.
- [5] Robert C. Eisenmann, Sr. and Robert C. Eisenmann, Jr. *Machinery Malfunction Diagnosis and Correction. Vibration Analysis and Troubleshooting for the Process Industries*. Prentice Hall, 2000.
- [6] G. A. Casasola. *Multianálisis frecuencial y estadístico de la vibración emitida por un elemento mecánico con fallo bajo diferentes estados de carga*. Proyecto Final de Carrera. Universidad Carlos III, Madrid, 2002.
- [7] Página web: <http://www.industrialndt.com/magnetic-particle.html>, última visita: 01-2016.
- [8] Apuntes de Mantenimiento industrial. Asignatura: Tecnología de Máquinas. <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/tecnologia-de-maquinas/material-de-clase-1/MANTENIMIENTO.pdf/view>, última visita: 01-2016.
- [9] A. J. Ordoñez. *Monitorización y diagnosis de fisuras en ejes aplicando la transformada wavelet y las redes neuronales artificiales*. Tesis. Universidad Carlos III, Madrid, 2009.
- [10] M. Pasamontes. *La transformada de Wavelet en el análisis de señales. Aplicación a vibraciones en sistemas rotativos*. Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III, Madrid.
- [11] S. Braun. *Discovering signal processing: an interactive guide form engineers*. John Wiley & Sons, 2008.
- [12] O. Medina. *Utilización de la transformada de Wavelet en el Procesamiento de Imágenes*. Universidad Autónoma Metropolitana, México D.F., 2007.
- [13] A. Jensen and A. la Cour-Harbo. *Ripples in Mathematics*. Springer, 2000.
- [14] R. Moreno, P. Pintado, J.M. Chicharro, A.L. Morales, and A.J. Nieto. Methodology for evaluating neural networks input for gear fault detection. In *IEEE International Conference on Mechatronics*, pages 1-6, Málaga, April 2009.

- [15] J. López. *Wavelets Concepto y aplicaciones para el Análisis de Señales*. Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear. Universidad Complutense de Madrid. Octubre 2004.
- [16] E. Romero. *Procesamiento digital de señales vibratorias mediante las Transformadas Wavelet Packets*. Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III, Madrid.
- [17] Página web: <http://www.schaeffler.es/content.schaeffler.es/es/mediathek/library/library-detail-language.jsp?id=52877569>, última visita: 01-2016.
- [18] Página web: <http://www.preditec.com/condition-monitoring/>, última visita: 01-2016.
- [19] Manual de especificaciones del motor MARATHON 56T34F5301 J. <http://www.marathonelectric.com/MMPS/details.jsp?item=056T34F5301>, última visita: 01-2016.
- [20] A. Adrados. *Análisis de sistemas de clasificación de defectos en ejes*. Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III, Madrid, 2011.
- [21] J. Romero. *Herramienta para la adquisición, procesamiento y monitorización de señales. Detección de fallos en ejes y rodamientos mecánicos*. Universidad Carlos III, Madrid, 2011.
- [22] Manual de especificaciones del Filtro MMF M32. Julio 2008.
- [23] Página web de Keithley, fabricante de la tarjeta de adquisición de datos <http://www.keithley.com>, última visita: 01-2016.
- [24] J.C. García-Prada and J.I. Pedrero. *Cálculo, construcción y ensayo de máquinas I. Vibraciones en máquinas*. UNED, 1993.
- [25] S.M. Ross. *Introductory Statistics*. Second Edition. Elsevier, 2005.
- [26] W. Wang, F. Ismail, and F. Golnaraghi. *Assesment of gear damage monitoring techniques using vibration measurements*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15(5):905–922, 2001.
- [27] O.J. Lara. *Nuevas Metodologías no Invasivas de Diagnosis de Defectos Incipientes en Rodamientos de Bola*. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III, Madrid, 2007.
- [28] V. Gil. *Diseño de un sistema de clasificación para detección de fallos en ejes de ferrocarril mediante la energía WPT*. Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III, Madrid, 2013.
- [29] Página web: http://www.advanced-ndt.co.uk/flaw_detectors.htm, última visita 01-2016.

Anexo A

Plano del eje ferroviario

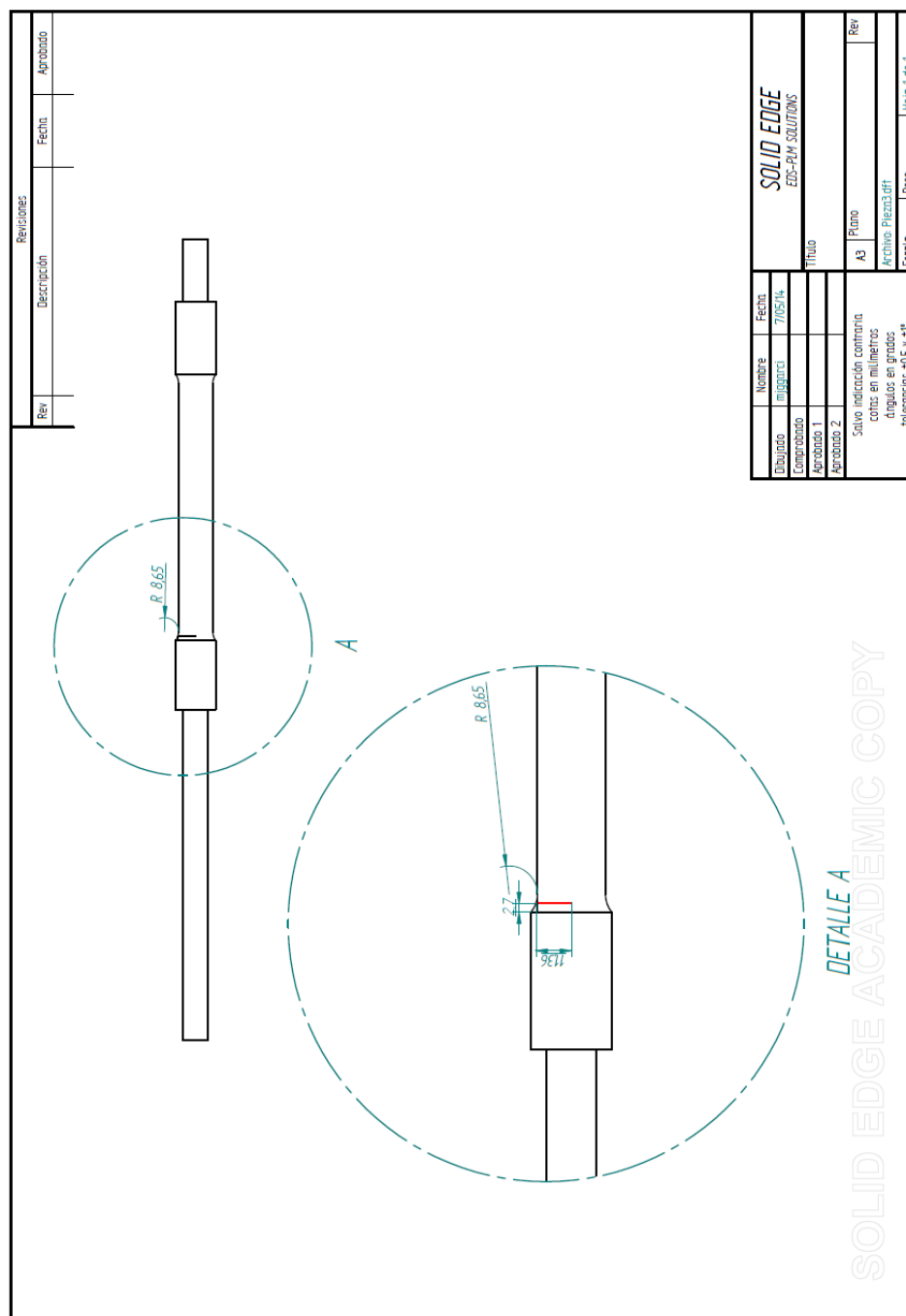


Figura A.1: Plano del eje ferroviario junto con vista detalle del defecto generado.



Anexo B

Protocolo de medidas

El protocolo de medidas seguido para la adquisición de datos consta de los siguientes pasos:

- Al inicio de la sesión, el primer paso es comprobar el montaje de la maquinaria, es decir, que todos los elementos están correctamente fijados.
- A continuación, se comprueban las conexiones de los equipos de medida. Se comienza comprobando la posición del acelerómetro ya que, debido a las vibraciones, puede ser desplazado de su posición. Las conexiones de los cables deben estar correctamente cerradas, y los cables deben estar fijados para no experimentar movimiento durante la adquisición (lo que podría introducir ruido). Además, no deben tocar al eje ni a ningún elemento mecánico en movimiento.
- Una vez realizadas estas comprobaciones, se cierra la compuerta de seguridad.
- En ese momento se arranca el motor y, por medio del regulador, se le hace girar a la velocidad de 1.200 r.p.m. para que el motor vaya alcanzando su temperatura de régimen.
- Mientras el motor va adquiriendo temperatura, se comprueban los parámetros del acondicionador de señal y del ordenador, que deben estar encendidos.
 - Los parámetros del acondicionador de señal deben ser:
 - Filtro paso alto: 0,1Hz.
 - Filtro paso bajo: 3KHz.
 - Ganancia de la señal: 10 mV/V
 - Sensibilidad: 3,172 pC/ms-2
 - Los parámetros a fijar en el software de adquisición son:
 - Frecuencia de muestreo: 6.000Hz.
 - Número de puntos de cada señal: 16.384
 - Número de ciclos a medir: 100
 - Tiempo a esperar entre ciclos: 1s
- Comenzar la adquisición. Cada sesión de medida se considera un grupo de seis medidas como esta. La secuencia de velocidades será alternada de esta forma: 20Hz, 40Hz, 60Hz,

20Hz, 40Hz, 60Hz para evitar sobrecalentamientos y garantizar que la temperatura al inicio sea siempre parecida. Cada medida se almacena por orden en una carpeta con nombre la fecha, y con los siguientes sufijos correspondientes: -1, -2-, -3, -4, -5, -6. De esta manera, se sabe que los sufijos -1 y -4 se corresponden con las velocidades de 20Hz, el -2 y el -5 con la velocidad de 40Hz y el -3 y el -6 a 60Hz.

- Una vez finalizada la adquisición, el grupo total de medidas obtenido se almacena en una carpeta con el nombre correspondiente a la fecha en la que se ha realizado la adquisición. A continuación, se rellena una tabla Excel donde se especifican todos los parámetros de medida utilizados, especialmente el nivel de defecto del eje y la fecha.
- Una vez finalizados los ensayos se apagan y desconectan todos los dispositivos.

Anexo C

Gráficos de los resultados

1. Resultados para 20 HZ

1.1. Primer armónico (1x)

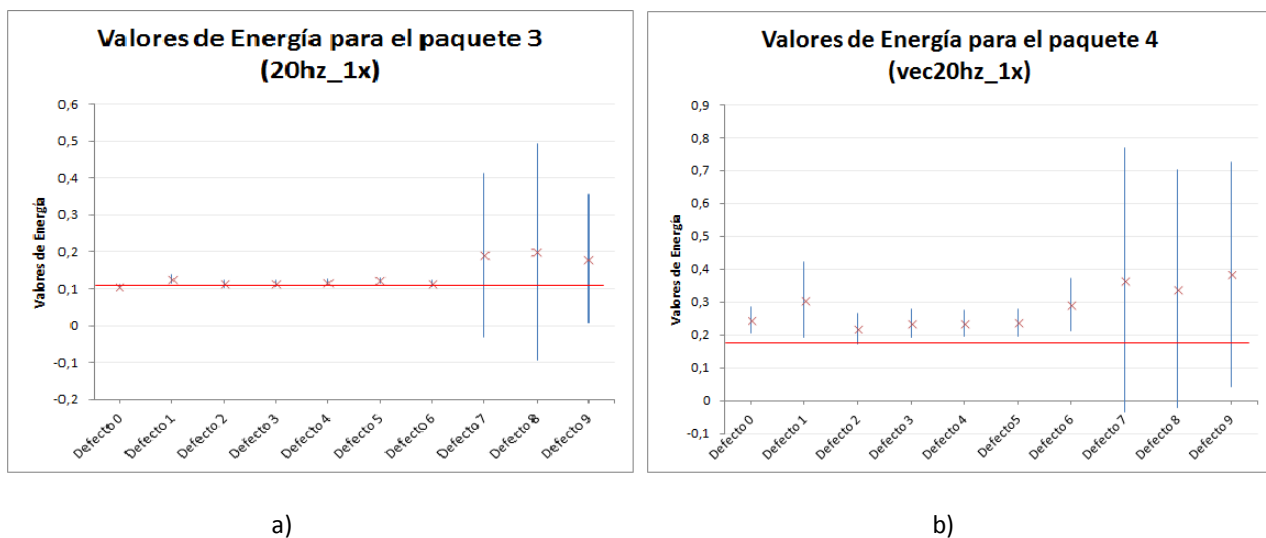


Figura C.1: a) Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 3, correspondiente con la frecuencia del primer armónico de la velocidad de giro de 20 Hz. b) Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 4, correspondiente con el paquete vecino del primer armónico de la velocidad de giro de 20 Hz .

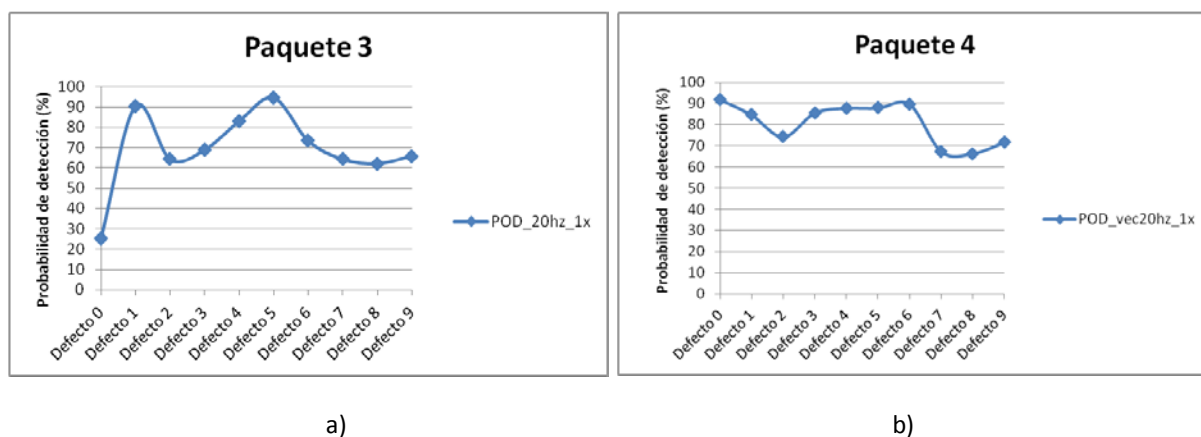


Figura C.2: a) curva POD del primer armónico a 20 Hz. b) curva POD del vecino del primer armónico a 20Hz.

1.2. Segundo armónico (2x)

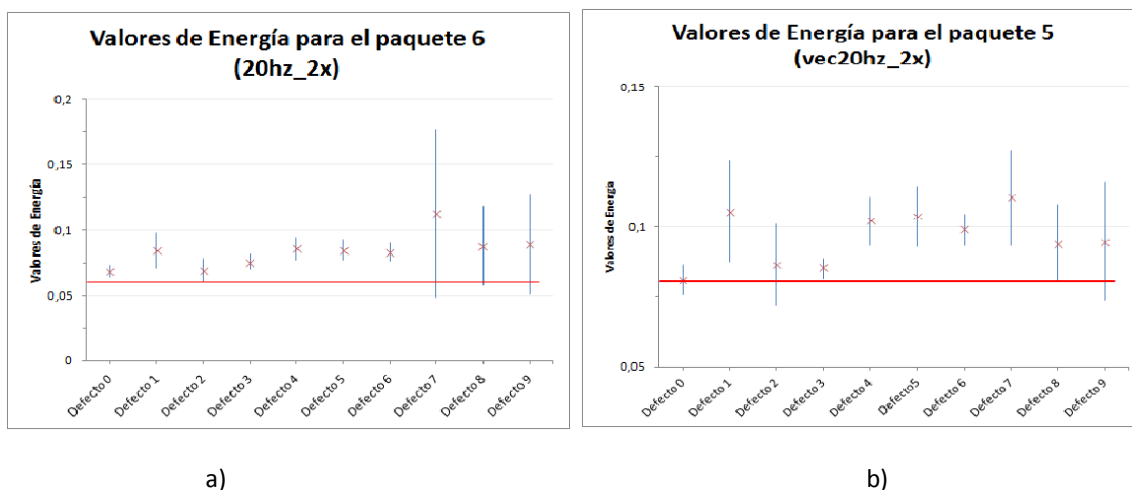


Figura C.3: a) Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 6, correspondiente con la frecuencia del segundo armónico de la velocidad de giro de 20 Hz. b) Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 5, correspondiente con el paquete vecino del segundo armónico de la velocidad de giro de 20 Hz .

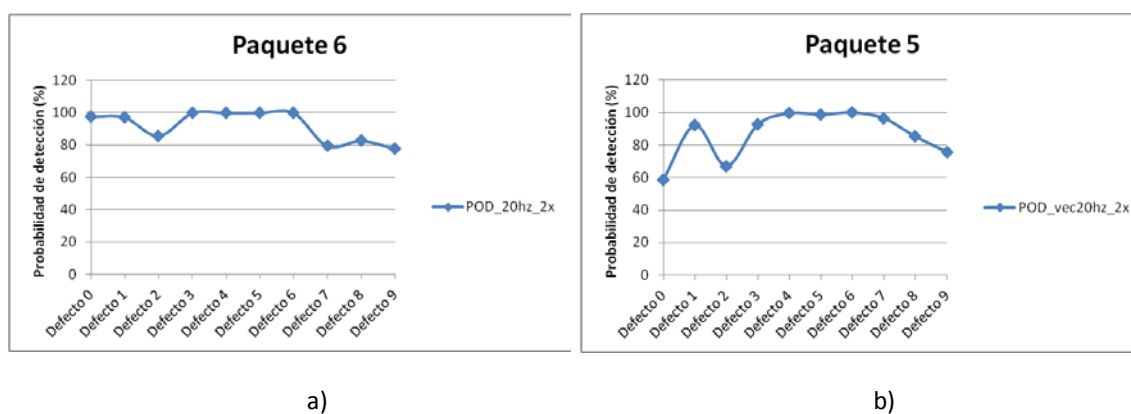


Figura C.4: a) curva POD del segundo armónico a 20 Hz. b) curva POD del vecino del segundo armónico a 20Hz.

1.3. Cuarto armónico (4x)

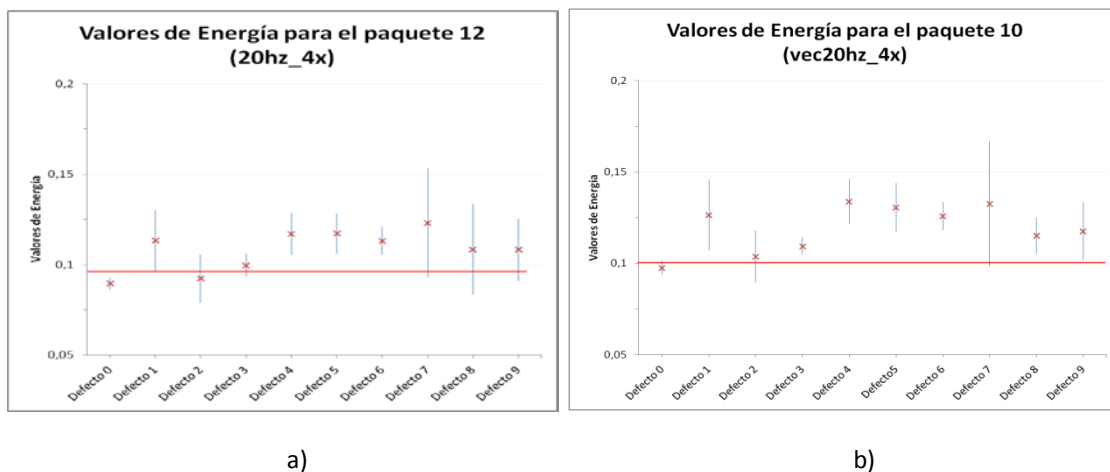


Figura C.5: a) Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 12, correspondiente con la frecuencia del cuarto armónico de la velocidad de giro de 20 Hz. b) Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 10, correspondiente con el paquete vecino del cuarto armónico de la velocidad de giro de 20 Hz .

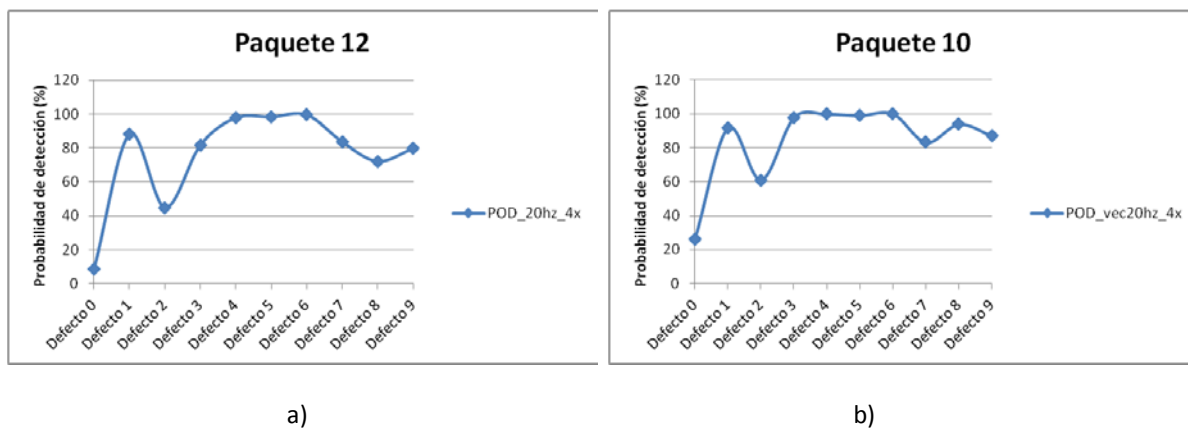


Figura C.6: a) curva POD del cuarto armónico a 20 Hz. b) curva POD del vecino del cuarto armónico a 20Hz.

1.4. Quinto armónico (5x)

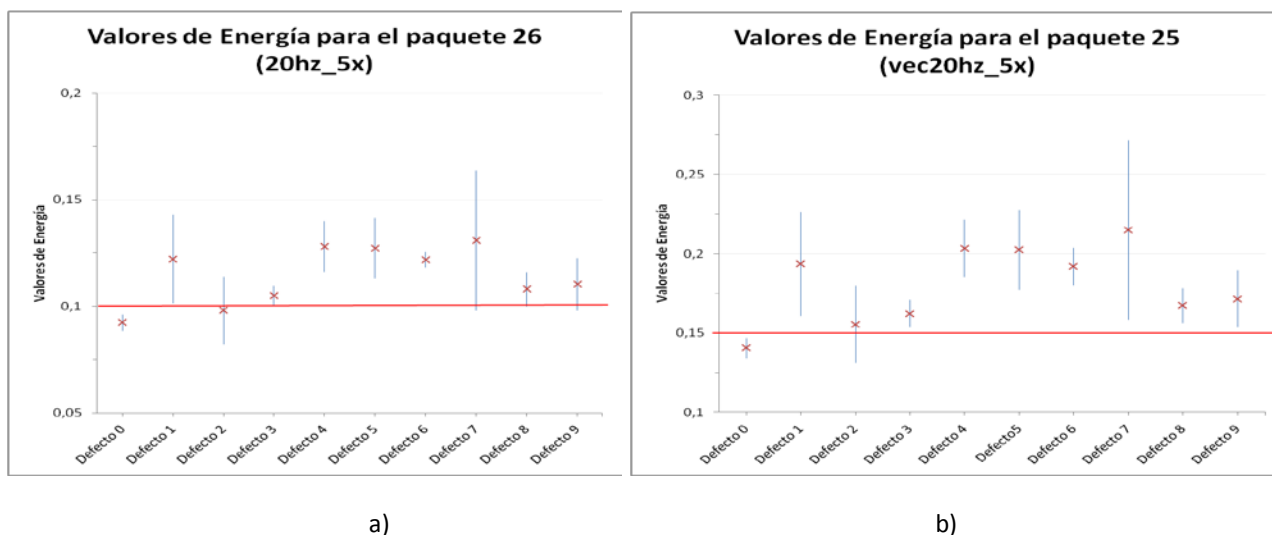


Figura C.7: a) Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 26, correspondiente con la frecuencia del quinto armónico de la velocidad de giro de 20 Hz. b) Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 25, correspondiente con el paquete vecino del quinto armónico de la velocidad de giro de 20 Hz .

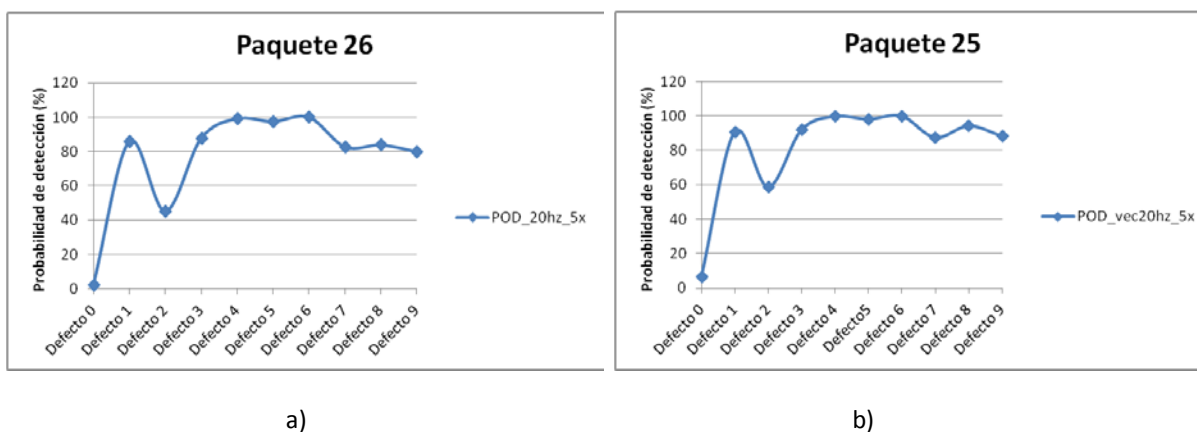


Figura C.8: a) curva POD del quinto armónico a 20 Hz. b) curva POD del vecino del quinto armónico a 20Hz.

2. Resultados para 40 HZ

2.1. Primer armónico (1x)

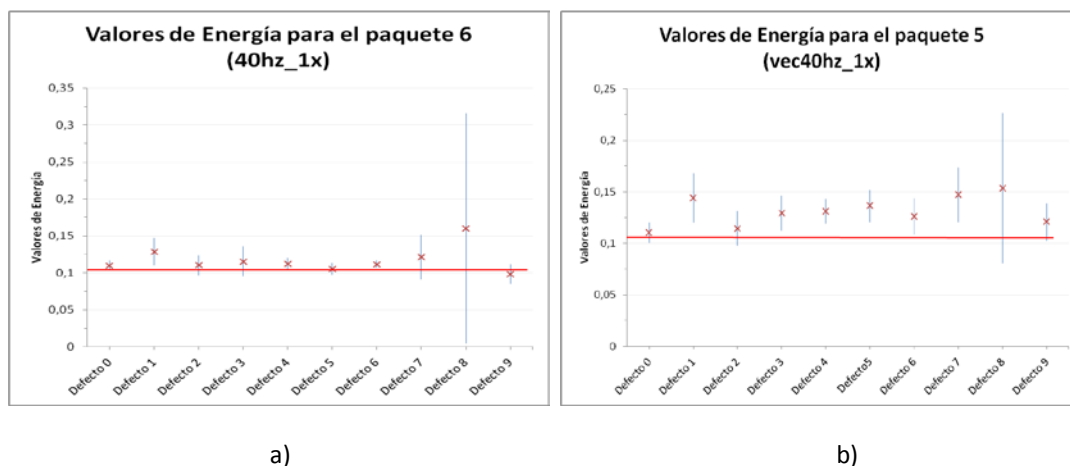


Figura C.9: a) Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 6, correspondiente con la frecuencia del primer armónico de la velocidad de giro de 40 Hz. b) Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 5, correspondiente con el paquete vecino del primer armónico de la velocidad de giro de 40 Hz .

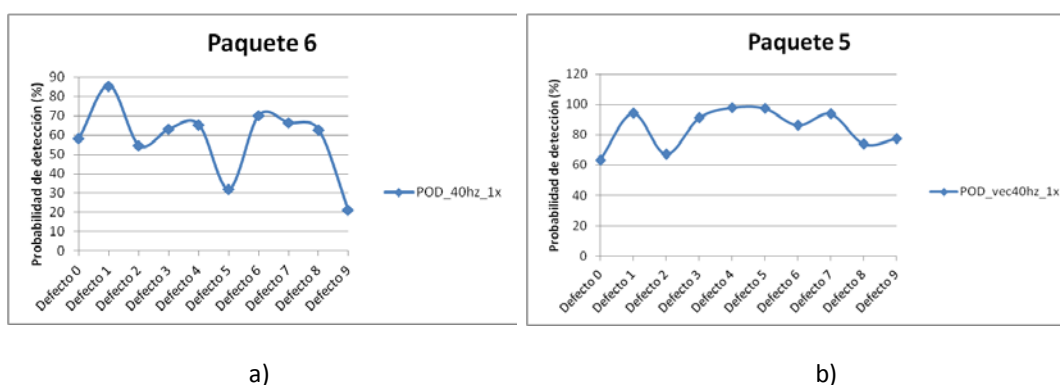


Figura C.10: a) curva POD del primer armónico a 40 Hz. b) curva POD del vecino del primer armónico a 40Hz.

2.2. Segundo armónico (2x)

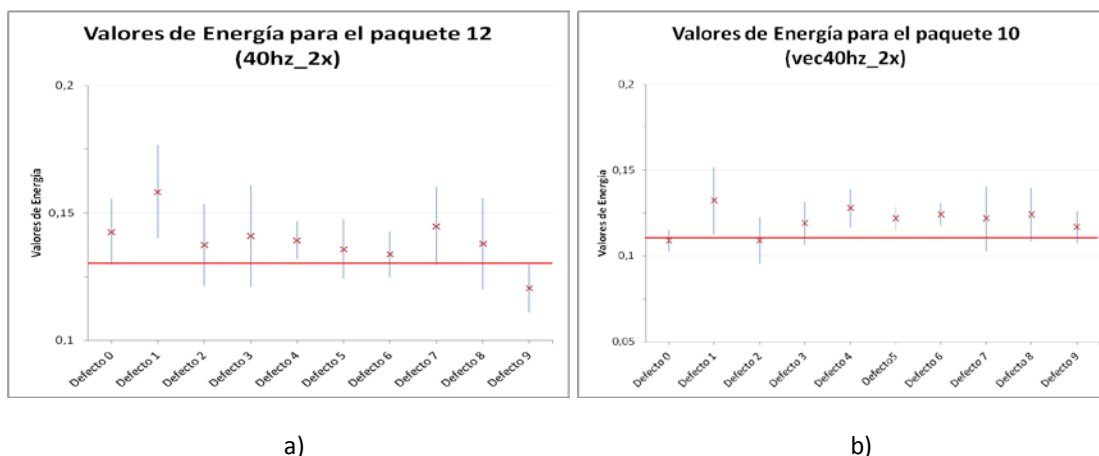


Figura C.11: a) Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 12, correspondiente con la frecuencia del segundo armónico de la velocidad de giro de 40 Hz. b) Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 10, correspondiente con el paquete vecino del segundo armónico de la velocidad de giro de 40 Hz .

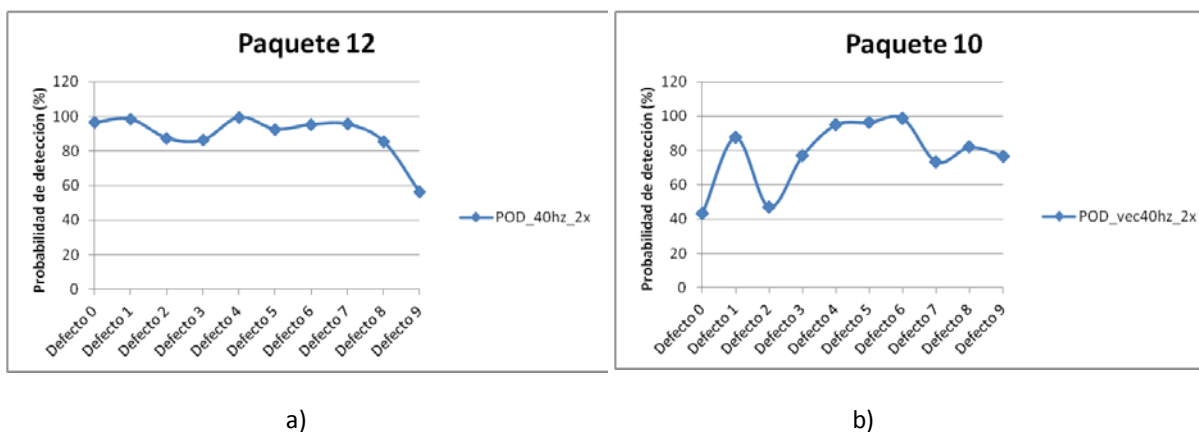


Figura C.12: a) curva POD del segundo armónico a 40 Hz. b) curva POD del vecino del segundo armónico a 40Hz.

2.3. Cuarto armónico (4x)

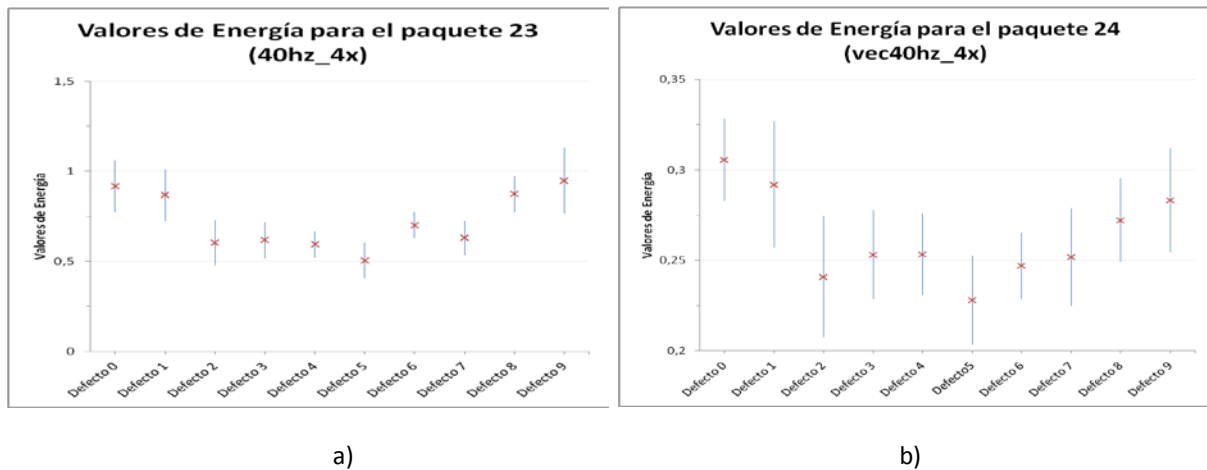


Figura C.13: a) Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 23, correspondiente con la frecuencia del cuarto armónico de la velocidad de giro de 40 Hz. b) Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 24, correspondiente con el paquete vecino del cuarto armónico de la velocidad de giro de 40 Hz .

2.4. Quinto armónico (5x)

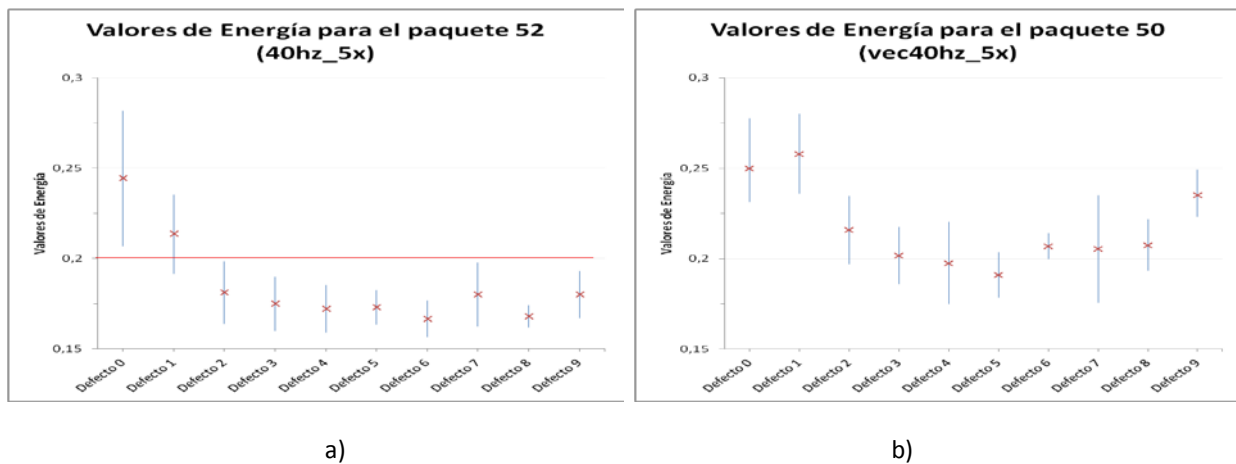


Figura C.14: a) Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 52, correspondiente con la frecuencia del quinto armónico de la velocidad de giro de 40 Hz. b) Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 50, correspondiente con el paquete vecino del quinto armónico de la velocidad de giro de 40 Hz .

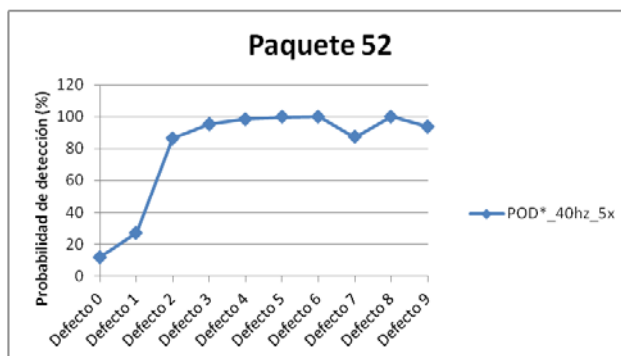
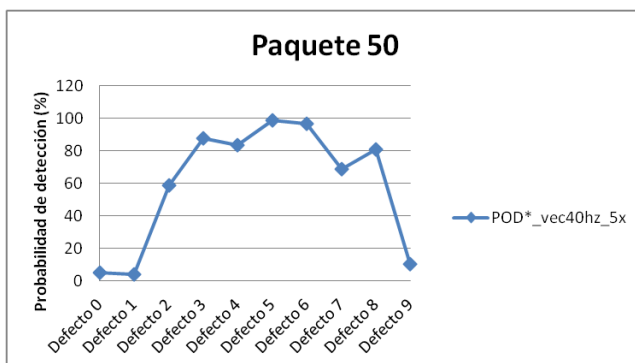
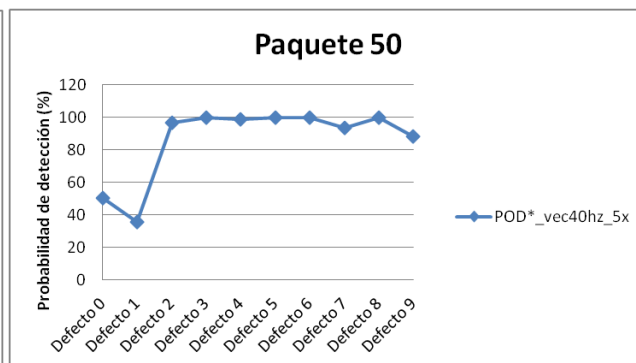


Figura C.15: Probabilidad de detección por debajo del valor umbral para el paquete 52, correspondiente con la frecuencia del quinto armónico de la velocidad de giro de 40 Hz.



a)

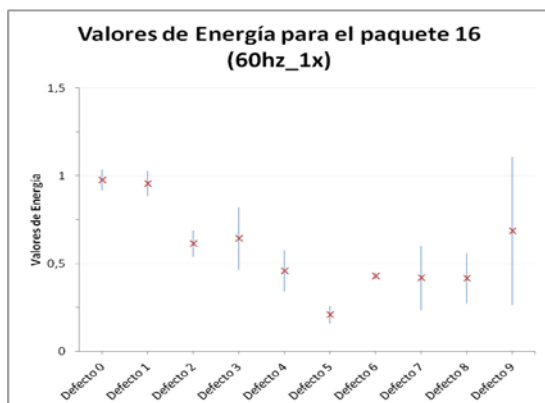


b)

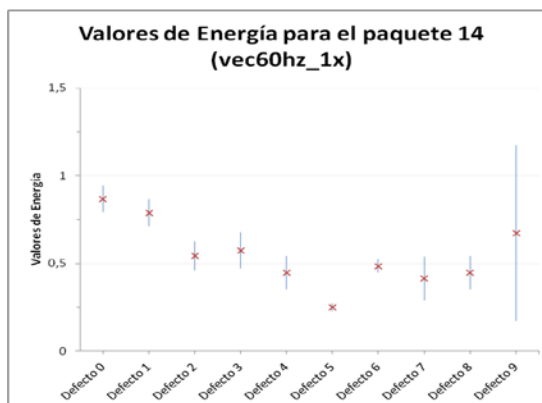
Figura C.16: Probabilidad de detección por debajo del valor umbral para el paquete vecino del quinto armónico de la velocidad de giro de 40 Hz. a) optimizando falsas alarmas. b) optimizando tasas de detección.

3. Resultados para 60 HZ

3.1. Primer armónico (1x)



a)



b)

Figura C.16: a) Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 16, correspondiente con la frecuencia del primer armónico de la velocidad de giro de 60 Hz. b) Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 14, correspondiente con el paquete vecino del primer armónico de la velocidad de giro de 60 Hz.

3.2. Segundo armónico (2x)

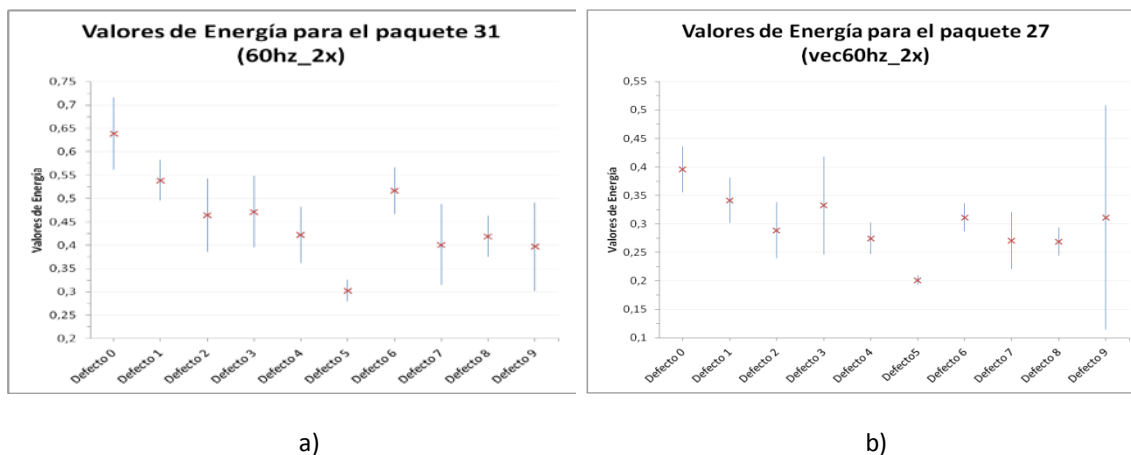


Figura C.17: a) Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 31, correspondiente con la frecuencia del segundo armónico de la velocidad de giro de 60 Hz. b) Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 27, correspondiente con el paquete vecino del segundo armónico de la velocidad de giro de 60 Hz .

3.3. Cuarto armónico (4x)

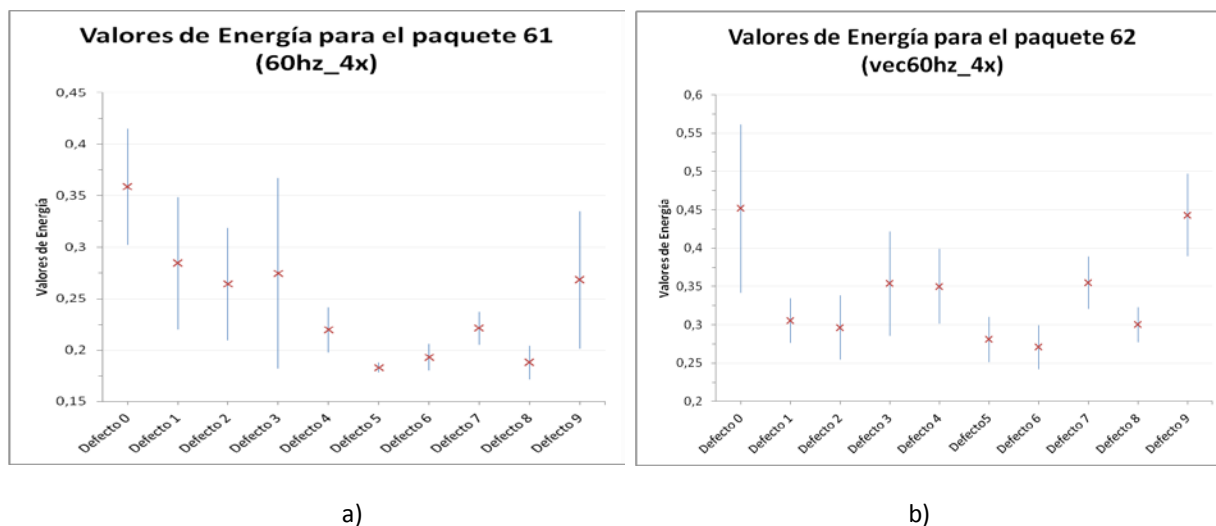


Figura C.18: a) Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 61, correspondiente con la frecuencia del cuarto armónico de la velocidad de giro de 60 Hz. b) Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 62, correspondiente con el paquete vecino del cuarto armónico de la velocidad de giro de 60 Hz .

3.4. Quinto armónico (5x)

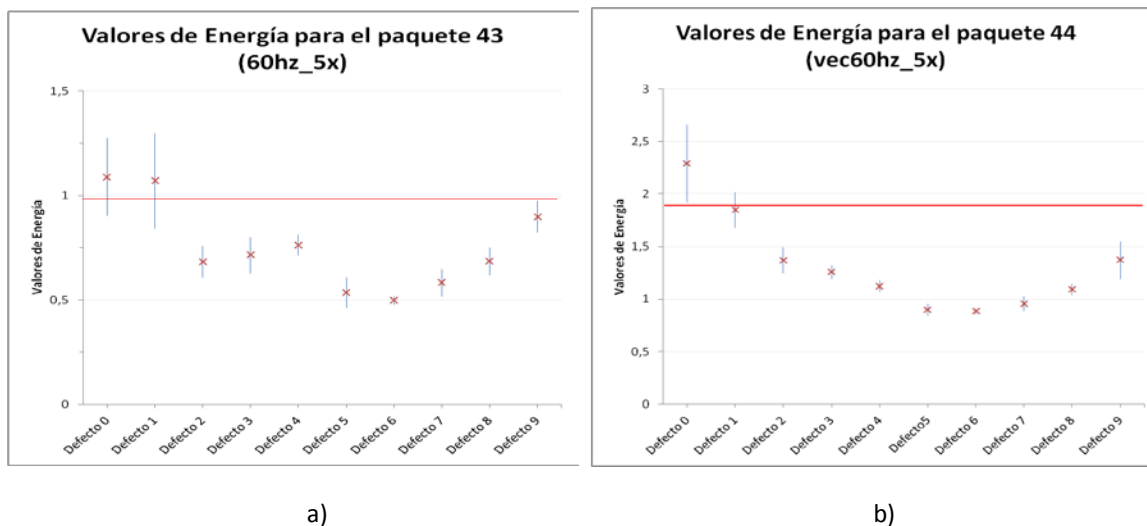


Figura C.19: a) Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 43, correspondiente con la frecuencia del quinto armónico de la velocidad de giro de 60 Hz. b) Valor medio y desviación (en azul) de energía para el paquete 44, correspondiente con el paquete vecino del quinto armónico de la velocidad de giro de 60 Hz .

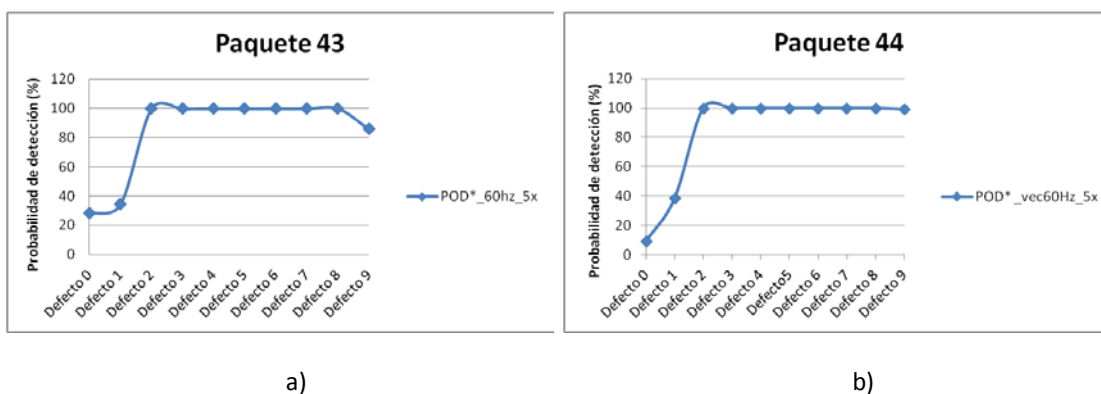


Figura C.20: a) curva POD del quinto armónico a 60 Hz. b) curva POD del vecino del quinto armónico a 60Hz.